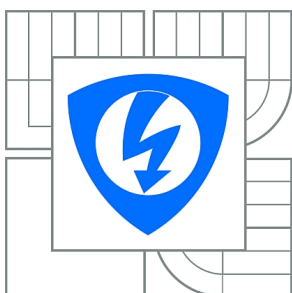




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## NÁVRH OZVUČOVACÍ APARATURY

DESIGN OF SOUND REINFORCEMENT SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MIROSLAV KOŠARIŠŤAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Miroslav Košarišťan

**ID:** 78174

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh ozvučovací aparatury

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku ozvučovací techniky, porovnejte používané druhy zesilovačů, korektorů a dalších součástí z hlediska jejich parametrů. Navrhněte blokové schéma ozvučovací aparatury s nastavitelnými vstupy (mikrofonní, linkové, stereofonní), čtyřpásmovým korektorem, indikátorem úrovně, frekvenční výhybkou a výstupy s volitelným připojením dalších zařízení. Hlavní části navrženého zařízení simulujte v programu PSpice, navrhněte desky plošných spojů v programu Eagle.

Na základě předchozích návrhových prací proveďte fyzickou konstrukci ozvučovací aparatury předepsaných parametrů. Pro zařízení navrhněte vhodnou napájecí jednotku, včetně návrhu transformátoru. Ozvučovací aparaturu oživte a proměřte její základní charakteristiky, měření porovnejte s výsledky počítačových simulací a s parametry teoreticky očekávanými.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[2] BALLOU, G. Handbook for Sound Engineers, 3/E. Oxford: Focal Press, 2005.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá návrhem ozvučovací aparatury. V první části jsou teoreticky vysvětleny hlavní části aparatury, jako jsou mikrofony, zesilovače, korektory, výhybky, reprosoustavy a reproduktory. Další část je věnována vlastnímu návrhu, počínaje blokovým schématem a následujícím návrhem jednotlivých důležitých částí, ty jsou také pomocí programu Eagle vytvořeny jako desky plošných spojů. U vybraných zapojení je ukázka simulací v programu PSpice a také měření důležitých charakteristik. Nezbytnou součástí diplomové práce je také konstrukční zpracování aparatury. Na závěr této práce jsou ukázky jednotlivých desek plošných spojů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ozvučování, mikrofony, zesilovače, korektory, reprosoustavy, reproduktory.

## **ABSTRACT**

This Master's thesis deals with sound apparatus. The first part is a theoretical explanation of the main part of the equipment, such as microphones, amplifiers, proofreaders, switches and speakers. Another section is devoted to the design itself, starting with the block diagram which is followed by the design of single important parts. These are made as PCB. For selected diagrams there is an example of PSpice program simulations and the measurement of important characteristics. The essential part of the work also addresses constructional processing of apparatus. At the end of this thesis some examples of the PCB are introduced.

## **KEYWORDS**

Sound systems, microphones, amplifiers, proofreaders, speakers, loudspeakers.

KOŠARIŠŤAN, M. *Návrh ozvučovací aparatury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 66 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh ozvučovací aparatury jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 23. května 2014

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Lubomírovi Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 23. května 2014

.....  
podpis autora

# OBSAH

## Seznam obrázků

Úvod.....	8
1 Vznik zvuku, princip šíření akustické vlny.....	9
2 Základní součástí ozvučovací aparatury, kmitočtově závislé obvody.....	10
2.1 Mikrofony.....	10
2.2 Zesilovače, předzesilovače.....	11
2.2.1 Napěťové zesilovače.....	11
2.2.2 Výkonové zesilovače.....	12
2.2.3 Elektronkové předzesilovače.....	12
2.2.4 Tranzistor jako lineární zesilovač.....	12
2.2.5 Operační zesilovač.....	13
2.3 Kmitočtové filtry.....	13
2.4 Reproduktorové výhybky.....	13
2.5 Reprosoustavy.....	15
2.6 Ozvučnice reprosoustavy.....	16
2.7 Reprodukory.....	17
3 Vlastní návrh ozvučovací aparatury.....	19
3.1 Blokové schéma .....	19
3.2 Mikrofonní předzesilovač .....	20
3.3 Symetrický a stereofoní předzesilovač .....	23
3.4 Obvody vstupních regulací .....	27
3.5 Čtyřpásmový semiparametrický korektor.....	31

3.6 VU metr .....	35
3.7 Crossover (aktivní výhybka) .....	37
3.8 Obvody výstupů, relé .....	40
3.9 Výstupní výkonový zesilovač .....	42
3.10 Napájecí zdroj $\pm 15\text{ V}$ .....	48
3.11 Anodový zdroj .....	48
3.12 Zdroj žhavení elektronek .....	50
3.13 Toroidní transformátor .....	50
4 Konstrukce zařízení .....	51
5 Závěr .....	56
6 Seznam použité literatury .....	57
8 Přílohy .....	59
Příloha 1: Deska plošného spoje mikrofonního předzesilovače .....	59
Příloha 2: Deska plošného spoje symetrického předzesilovače .....	59
Příloha 3: Deska plošného spoje stereofonního předzesilovače .....	60
Příloha 4: Deska plošného spoje obvodů vstupních regulací .....	60
Příloha 5: Deska plošného spoje čtyřpásmového semiparametrického korektoru .....	61
Příloha 6: Deska plošného spoje VU metru .....	61
Příloha 7: Deska plošného spoje crossoveru .....	61
Příloha 8: Deska plošného spoje výstupního zesilovače s elektronkovým předzesilovačem .....	62
Příloha 9: Deska plošného spoje výstupního zesilovače s elektronkovým předzesilovačem .....	62
Příloha 10: Deska plošných spojů obvodů výstupů .....	63

Příloha 11: Deska plošných spojů anodového zdroje .....	63
Příloha 12: Deska plošných spojů zdroje napětí pro žhavení elektronek a pro ochranný obvod výstupního zesilovače .....	64

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Příklady různých propustí a jejich výpočtů .....	15
Obr. 2: Ukázka hlubokotónového reproduktoru .....	18
Obr. 3: Blokové schéma ozvučovací aparatury .....	19
Obr. 4: Schéma mikrofonního předzesilovače .....	21
Obr. 5: Deska plošných spojů mikrofonního předzesilovače .....	22
Obr. 6: Frekvenční přenosová modulová charakteristika mikrofonního předzesilovače .....	22
Obr. 7: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika mikrofonního předzesilovače .....	23
Obr. 8: Schéma převodu symetrického vstupu na nesymetrický výstup .....	24
Obr. 9: Deska plošných spojů symetrického předzesilovače .....	24
Obr. 10: Frekvenční přenosová modulová charakteristika stereofonního předzesilovače .....	25
Obr. 11: Frekvenční přenosová modulová charakteristika symetrického vstupu, různé úrovně zesílení .....	25
Obr. 12: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika symetrického vstupu, různé úrovně zesílení .....	26
Obr. 13: Schéma stereofonního předzesilovače .....	26
Obr. 14: Deska plošných spojů stereofonního předzesilovače .....	27
Obr. 15: Schéma obvodů vstupních regulací .....	28
Obr. 16: Deska plošných spojů obvodů vstupních regulací .....	29
Obr. 17: Frekvenční přenosová modulová charakteristika vstupních obvodů, nastavení faderu: vrchní potenciometr nastaven na 0,9, spodní na 0,1 .....	29
Obr. 18: Frekvenční přenosová modulová charakteristika vstupních obvodů, nastavení faderu: oba nastaveny na hodnotu 0,5 .....	30

Obr. 19: Frekvenční přenosová modulová charakteristika vstupních obvodů, nastavení faderu: vrchní potenciometr nastaven na 0,1, spodní na 0,9 .....	30
Obr. 20: Schéma čtyřpásmového semiparametrického korektoru .....	32
Obr. 21: Deska plošných spojů čtyřpásmového semiparametrického korektoru .....	32
Obr. 22: Frekvenční přenosová modulová charakteristika korektoru, parametrické středy nastavené potenciometry P3 a P5 na hodnotu 0,5 .....	33
Obr. 23: Frekvenční přenosová modulová charakteristika korektoru, parametrické středy nastavené potenciometry P3 a P5 na hodnotu 0,8 .....	33
Obr. 24: Frekvenční přenosová modulová charakteristika korektoru, parametrické středy nastavené potenciometry P3 a P5 na hodnotu 1 .....	34
Obr. 25: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika .....	34
Obr. 26: Schéma VU metru .....	36
Obr. 27: Deska plošných spojů VU metru .....	37
Obr. 28: Schéma crossoveru .....	38
Obr. 29: Deska plošných spojů crossoveru .....	39
Obr. 30: Frekvenční přenosová modulová charakteristika .....	39
Obr. 31: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika crossoveru .....	40
Obr. 32: Schéma obvodů výstupů .....	41
Obr. 33: Deska plošných spojů obvodů výstupů .....	42
Obr. 34: Schéma elektronkového předzesilovače .....	43
Obr. 35: Deska plošných spojů elektronkového předzesilovače .....	43
Obr. 36: Frekvenční přenosová modulová charakteristika elektronkového předzesilovače .....	43
Obr. 37: Schéma výstupního zesilovače s ochranným obvodem .....	44
Obr. 38: Deska plošných spojů výstupního zesilovače a ochranného obvodu .....	45
Obr. 39: Frekvenční přenosová modulová charakteristika výstupního zesilovače .....	45
Obr. 40: Výstupní amplituda při vstupní amplitudě 10 V .....	46
Obr. 41: Výstupní amplituda při vstupní amplitudě 30 V .....	46
Obr. 42: Ověření spínání ochranného obvodu při určité hodnotě .....	47
Obr. 43: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika výstupního zesilovače .....	47
Obr. 44: Schéma napájecího zdroje $\pm 15$ V .....	48



Obr. 45: Deska plošných spojů napájecího zdroje $\pm 15\text{ V}$ .....	48
Obr. 46: Schéma anodového zdroje .....	49
Obr. 47: Deska plošných spojů anodového zdroje .....	49
Obr. 48: Simulace výstupního napětí .....	49
Obr. 49: Schéma zdroje napětí pro žhavení elektronek a pro ochranný obvod výstupního zesilovače .....	50
Obr. 50: Deska plošných spojů zdroje napětí pro žhavení elektronek a pro ochranný obvod výstupního zesilovače .....	50
Obr. 51: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: přední pohled.....	52
Obr. 52: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: boční pohled.....	52
Obr. 53: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: boční pohled .....	53
Obr. 54: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: přední pohled .....	53
Obr. 55: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: vrchní pohled.....	54
Obr. 56: Skutečná skříň: boční pohled.....	54
Obr. 57: Skutečná skříň: vrchní pohled.....	55
Obr. 58: Skutečná skříň: zadní pohled .....	55

# ÚVOD

Náš trh s audiotechnikou je v současnosti zahlcen přístroji ve velkém cenovém rozmezí, začínaje od tisíců až po někdy i více jak statisíce korun. Reklamy a testy největších světových výrobců elektroniky se na nás hrnou z každých stran. Otázkou je, jestli naše vynaložené peníze skutečně odpovídají předkládané kvalitě. Když se podíváme do různých dostupných časopisů a literatury s audiotechnikou, přijdeme na to, že stejný přístroj je hodnocený různě. O přístrojích přesahujících statisícové hranice nemusíme mluvit, ty jsou určené do jiné spotřebitelské kategorie. Nás bude spíše zajímat nižší ekonomická třída. Zde se dá najít také velmi kvalitní a cenově dostupné zařízení dobře hodnocené ve světových testech. V našich krajích se prosazují značky ozvučovací techniky např. Dudek, AU/RA, Dexon, Xavian, AQ, atd. Pro kvalitní ozvučení se klade důraz na každou část ozvučovací aparatury. Nejprve se jedná o reprosoustavy, akustiku místnosti, poté zesilovací komponenty a až nakonec zdroje nízkofrekvenčního signálu. V naší republice se vyrábějí velmi kvalitní audio komponenty a zařízení, které se umísťují na předních světových místech, určitě by jsme si v jejich portfoliích vybrali vhodně pro naše finanční možnosti.

Přenést signál ze vstupu na výstup bez nežádoucích změn úrovně signálu je hlavní účel konstruktérů elektroakustických zařízení. Vytváří se proto různé obvody, které nechťené zdůraznění či potlačení určitého kmitočtového pásma dorovná přesně svým zrcadlovým obrazem charakteristiky.

Uvedená diplomová práce se zabývá návrhem ozvučovací aparatury. Nejprve je popsána teorie základních částí aparatury od mikrofónů, následovanými zesilovači, korektory, výhybkami až po reproduktory. Ve vlastním návrhu aparatury je ukázáno blokové schéma, následuje probrání každé zapojení aparatury, ty jsou také navrhnuté v programu Eagle s příslušnými navrhnutými deskami plošných spojů, vybrané zapojení jsou simulované v programu PSpice a také měřeny v laboratoři a srovnány s hodnotami simulovanými. Celá práce bude umístěna v typizované 19" skříni od špičkové německé firmy Fisher Elektronik GmbH und Co. Kg, musí se tedy účelově rozmístit jednotlivé desky plošných spojů v této skříni (nastavení zesílení, úrovně předzesilovačů, nastavení korektorů v přední části skříně, konektory v zadní části atd.). Na závěr v příloze jsou předloženy fotky osazených desek plošných spojů. Síťový napájecí toroidní transformátor je vybrán podle potřeby z nabídky elektrotechnické firmy, u které je možnost výroby transformátoru na zakázku.

# 1. VZNIK ZVUKU, PRINCIP ŠÍŘENÍ AKUSTICKÉ VLNY

Obecně zvuk můžeme vyjádřit jako mechanické vlnění, které vznikne chvěním pružných těles a šíří se také v každém pružném prostředí, v nepružném prostředí se šíří jen malá část. Vlnění rozdělujeme na příčné a podélné. S podélným vlněním se setkáme téměř všude, kdežto příčné vlnění jen v tuhých látkách.

Důležitá vlastnost je rychlost zvuku a akustická rychlost. Rychlost zvuku má stálý směr, závisí na atmosférickém tlaku, teplotě, hustotě prostředí. Naproti tomu akustická rychlost má směr střídavý a k ní také odpovídající střídavé veličiny – maximální akustická rychlost a efektivní akustická rychlost.

Při produkci zvuku dochází ke střídavému zhušťování a zředování částic, tím vznikají změny v atmosférickém tlaku. Akustický tlak je veličina střídavá, vyjadřujeme ji opět maximální a referenční hodnotou, jednotka pascal [Pa]. Většinou jej vyjadřujeme v logaritmickém vyjádření [dB].

Z dalších důležitých veličin, používaných nejen v elektroakustice, je *vlnová délka*  $\lambda$ . Na vlnové délce závisí zvuk tónu. Tóny se určují množstvím kmitů za sekundu [Hz] a amplitudou. Tón o malé frekvenci např. 40 Hz vnímáme jako hluboký, basový tón. Naopak tón o frekvenci např. 4000 Hz zní pískavě.

Čisté sinusové průběhy se téměř nevyskytují. Zvuk je v podstatě směs základní harmonické a dalších násobků vyšších harmonických složek. Tato směs všech složek vytváří barvu tónu. Ukažme si situaci na příkladu: máme-li základní tón o frekvenci 200 Hz, druhá harmonická od tohoto tónu má frekvenci 400 Hz, třetí 600 Hz atd. Zvukový signál obsahuje i subharmonické tóny, ty jsou naopak poloviční, tj.  $f/2$ .

Mohly bychom si myslet, že vždy převládá složka základního tónu ve složeném zvuku. Není tomu tak ve všech případech, v praxi se vyskytují i případy, kdy ve složeném zvuku není zastoupena vůbec. Každý hudební nástroj lze tedy určit podle poměru prvních základních harmonických tónů a k nim dalších vyšších harmonických složek. Zvuk hudebních nástrojů je ještě ovlivněn složkou, která vzniká v rezonančních skříních, roztrubů a dalších částí.

Průměrné lidské ucho vnímá akustické pásmo v rozsahu 30 Hz do 16 kHz. Platí to pro posluchače středního věku, starší lidé méně vnímají vyšší kmitočty. Základní hudební tóny se pohybují v rozmezí od 16 Hz do 4200 Hz, u varhan se dosahuje až 8400 Hz. [2]

## 2. ZÁKLADNÍ SOUČÁSTI OZVUČOVACÍ APARATURY, KMITOČTOVĚ ZÁVISLÉ OBVODY

### 2.1 Mikrofony

Mikrofon je jedna z nejdůležitějších vstupních součástí ozvučovací aparatury. Jeho výběr volíme v přijatelné ceně a k ní odpovídající dostačující kvalitě. Nemůžeme věnovat velkou část financí na super kvalitní mikrofon a pak ušetřit např. na koncovém zesilovači, nebo naopak. Celá aparatura musí být volena s vyváženou kvalitou jednotlivých komponent.

Mikrofon je určen pro přeměnu akustického signálu na elektrický. Moderní mikrofony dělíme na dynamické, páskové, elektretové, kapacitní. Mezi staršími typy najdeme uhlíkové (užívané do 40. let 20. století, s výjimkou použití v telefonech do 80. let) a piezoelektrické (užívané v 50. letech 20. století). Nejprve bych uvedl pár poznatků o nejpoužívanějších mikrofonech.

Dynamické mikrofony pracují na principu elektromagnetické indukce. Cívka je připevněná na membránu, která se rozechvěje po příchodu zvukové vlny. Cívka je umístěná v magnetickém poli a pohybem cívky se mění intenzita magnetického pole a tím se vytváří napětí. Mezi dobrými vlastnostmi těchto mikrofonů se uvádí fakt, že jsou téměř nepřebuditelné (při nízkém zkreslení zpracují velmi vysoké hladiny akustického tlaku), jsou odolné vůči vlhkosti a nepotřebují ke své funkci napájení. Jsou ale méně citlivé než kondenzátorové mikrofony.

Páskový mikrofon vychází z konstrukce dynamického s tím rozdílem, že membrána je tvořena kovovým páskem umístěným v magnetickém poli permanentního magnetu. Tento mikrofon je kvůli své konstrukce více náchylný k mechanickému poškození, proto se používá zásadně ve studiích.

Základem kondenzátorových mikrofonů je také membrána, která vytváří svým pohybem změnu kapacity. Vodivá membrána je nejčastěji pokryta zlatem. Kondenzátor tedy mění kapacitu, tím se přemísťuje energie v obvodu a vytváří úbytek napětí na rezistoru. Změna napětí je poměrně malá, musí se zesílit vysokoimpedančním zesilovačem. Kondenzátorové mikrofony se neobejdou bez napájení. Pro své široké spektrum snímání jsou řazeny mezi absolutní špičku, tím se jejich použití umísťuje v profesionálních sférách.

Mezi zvláštní případy kondenzátorových mikrofonů řadíme elektretové mikrofony, v nichž je vytvářeno elektretem elektrické pole nezbytné pro funkci mikrofonu. Pohybem membrány se mění opět kapacita kondenzátoru a tím i napětí mezi deskami. Tyto změny napětí jsou zesilovány zpravidla tranzistory FET kvůli jejich vysoké vstupní impedanci. Napájení elektretových mikrofonů je provedeno pouze pro vestavěný předzesilovač mikrofonu, mezi výhody patří relativní snadná vyrobitelnost – jsou levné, přesto kvalitní, díky dnešní technologii mohou dosahovat miniaturních rozměrů. [1]

Na závěr kapitoly „mikrofony“ bych uvedl pár poznatků a rad, jak správně používat mikrofon. Až 70% uživatelů mikrofonu používá mikrofon špatně, posluchači to pak svádějí na zvukaře a na techniku. Mikrofony elektrodynamické jsou určeny na použití zblízka, např. zpěv a řeč, kondenzátorové jsou použitelné na větší vzdálenost, např. na snímání různých nástrojů, schůzí, místností, atd. Uvedeme si tedy rady pro mikrofon elektrodynamický.

Mikrofon držíme klidně v prostřední části tubusu, neděláme s ním prudké pohyby. Hlavně ho nesmíme držet jako „svíčku“ na hrudi, jak to dělají reportéři v televizích. Mluvíme na něj přímo u úst. Ideální vzdálenost je přibližně 3 cm. Pokud jsme zpěváci, víme, že když chceme řvát a zpěv trochu zostřit, mikrofon oddálíme. Naopak pokud chceme zvýraznit nižší kmitočty, mikrofon přiblížíme. Popsaná metoda přibližování a vzdalování je tzv. proximity efekt. Protivětrná ochrana (také „protiprskací“ ve studiích) slouží k odstranění hukotu větru. Jde o návlek na hlavici mikrofonu, vyrábí se v různých velikostech a barvách. V Čechách se vžil slangový název „vinčus“, nebo celosvětově anglický název „windscreen“. Mikrofonní stojany používáme pokud se chceme hýbat, musíme ale, jak jsem zmiňoval dříve, mluvit na mikrofon zblízka. Poslední problematika užívání mikrofonu je nastoupení zpětné vazby. Aby ke zpětné vazbě nedocházelo, musíme mluvit na mikrofon zblízka (možnost nastavení menší citlivosti – menší náchylnost ke zpětné vazbě), pořizujeme jen kvalitní mikrofony (směrová charakteristika – nežádoucí snímání z bočních směrů), pohybujeme se jen za reproduktory (pokud jsme před reproduktory, ke zpětné vazbě dojde vždy). [3] [19]

## **2.2 Zesilovače, předzesilovače**

Reproduktor, který má výkon např. 60 W, nemůžeme budit přímo z mikrofonu s výkonem 1  $\mu$ W. Tyto malé signály musí být bez zkreslení zesíleny, pro tuto úlohu jsou určeny zesilovače. Hlavními prvky zesilovačů jsou aktivní prvky, tj. tranzistory, operační zesilovače, elektronky.

Zesilovací stupeň je charakterizován jako čtyřpól se dvěma vstupy a dvěma výstupy, tvořený zesilovacím prvkem a přídavnými obvody, které nastavují pracovní bod. Zesilovač mění díky transformaci elektrické energie z vnějšího napájecího zdroje parametry vstupního signálu. Zesílení, nebo zesilovací činitel je charakterizován poměrem výstupní a odpovídající vstupní veličiny. Rozlišujeme zesílení napěťové, proudové a výkonové.

Pro standardní zesilovač (kromě stejnosměrných zesilovačů) má význam zesílení veličin střídavého signálu, z řídící nebo proudové převodní charakteristiky lze určit střídavý zesilovací činitel  $\beta$ . Proudové zesílení pro střídavý signál má přibližně stejnou hodnotu jako proudový zesilovací činitel  $\beta$ . [4]

Zesilovače konstruujeme s integrovanými obvody, nebo s diskrétními součástkami. Použité zapojení semestrálního projektu využívá jak integrovaných obvodů, tak i výkonových MOSFET tranzistorů a v neposlední řadě také elektronek.

Uvedeme si hlavní rozdělení zesilovačů. Za prvé dělíme podle druhu použitých aktivních součástek – integrované obvody, tranzistory, elektronky. Pak podle kmitočtu vstupního signálu – nízkofrekvenční, vysokofrekvenční, impulzové, mikrovlnné, stejnosměrné, operační zesilovač. Poté podle budícího signálu – předzesilovače (signál malé úrovně), výkonové zesilovače (zesilují signál z předzesilovače na požadovaný výkon). Další dělení je podle počtu použitých stupňů – jednostupňové, více stupňové, pak podle šířky přenášeného pásma – úzkopásmové, širokopásmové, poté podle vazby mezi zesilovacími stupni – přímá, transformátorová a kapacitní vazba. Nakonec dělíme podle polohy klidového pracovního bodu – třídy A, AB, B, C, D, G, H.[17]

Zapojení výstupního výkonového zesilovače bude pracovat ve třídě AB.

### **2.2.1 Napěťové zesilovače**

Zesilovače napětí jsou v podstatě lineární, jejich pracovní bod se pohybuje ve třídě A. Jejich úkolem je zesílit vstupní signál tak, aby byl schopný vybudit koncové výkonové

zesilovače. Nejdůležitějšími parametry napěťového zesilovače jsou nelineární zkreslení a vlastní šum zesilovače, tyto dvě veličiny určují použitelnou dynamiku a jsou důležité pro odborníky při návrhu zesilovače. Podle zapojení zpětné vazby rozdělujeme zesilovače napětí na zesilovače korekční a zesilovače s lineární přenosovou charakteristikou. Realizaci napěťového zesilovače můžeme provést s tranzistorem nebo s použitím integrovaných obvodů. Tranzistory se zapojují nejčastěji se společným emitorem nebo kolektorem, zapojení se společnou bází se kvůli malému vstupnímu odporu nepoužívá. Dnes je velká spousta integrovaných obvodů pro zesílení nízkofrekvenčního signálu, mezi kvalitnější a dražší lze považovat řady LMExxxx. [2]

### **2.2.2 Výkonové zesilovače**

Výkonové zesilovače mají za úkol zesílit požadovaný signál na úroveň potřebnou k napájení reproduktorové soustavy. V práci jsou použity výkonové MOSFET tranzistory.

### **2.2.3 Elektronkový předzesilovač**

Elektronkový předzesilovač využívá ke svému zesílení elektronky, nejjednodušší zesilovací elektronkou je trioda (skládá se ze tří elektrod – anoda, katoda a řídící mřížka), další často používanou elektronkou je pentoda (složena z pěti elektrod – anodu, katodu, brzdicí mřížku, stínící mřížku a řídící mřížku). [14]

### **2.2.4 Tranzistor jako lineární zesilovač**

Tranzistor zapojený jako lineární zesilovač se vyskytuje ve třech zapojeních – zapojení se společným emitorem, kolektorem a bází. Probereme si stručně tyto tři základní zapojení. Zapojení se společnou bází vykazuje nejstabilnější výkonové zesílení, které není moc velké. Proudové zesílení je vždy menší než jedna, napěťové zesílení je schopno dosáhnout velkých hodnot. Výstupní napětí je ve fázi se vstupním napětím. Vstupní impedance je velmi malá (desítky a stovky  $\Omega$ ), výstupní impedance naopak vysoká (až několik  $M\Omega$ ). Pokud požadujeme od tohoto zapojení větší zesílení, je potřeba použít transformátorovou vazbu ve vstupním a výstupním obvodu kvůli rozdílným vstupním a výstupním impedancím.

Zapojení se společným kolektorem je v podstatě stabilně výkonově stejné jako zapojení se společnou bází, má však v podstatě menší zesílení. Napěťové zesílení je menší než jedna a proudové odpovídá zapojení se společným emitorem a výstupní napětí je také ve fázi s napětím vstupním. Zapojení se společným kolektorem se vyznačuje velmi vysokou (řádově) vstupní impedancí oproti těm dvěma zbývajícím, výstupní impedance je nejmenší ze všech uváděných zapojení. Toto zapojení se používá jen velmi zřídka, pokud chceme využít charakteristické impedance tohoto zapojení.

Třetí nejpoužívanější zapojení je zapojení se společným emitorem. Má sice nejméně stabilní výkonové zesílení (závislé na změnách proudového zesilovacího činitele  $h_{21}$ ), hlavní předností je největší výkonové zesílení ze všech uváděných zapojení tranzistoru. Napěťové zesílení je podobné jako u zapojení se společnou bází, proudové zesílení mnohem větší než jedna a výstupní napětí je fázově posunuto o  $180^\circ$  proti napětí vstupnímu. Vstupní impedance je přibližně o řád větší a výstupní impedance přibližně o dva řády menší než zapojení se společnou bází. Zapojení je vhodné pro kaskádně řazené zesilovací stupně (s přímou nebo RC vazbou), zapojení nepotřebuje ke své funkci transformátorovou vazbu (velké výkonové zesílení).

Shrneme si tedy nejdůležitější vlastnosti všech tří uváděných zapojení. Zapojení se společným emitorem má největší výkonové zesílení, vstupní a výstupní impedanci střední. Menší zesílení má zapojení se společnou bází, nízkou vstupní a velkou výstupní impedanci. Kolektorové zapojení má ze všech nejmenší zesílení, žádanou největší vstupní a nejmenší výstupní impedanci. [13]

### **2.2.5 Operační zesilovač**

Od napěťového operačního zesilovače požadujeme v ideálním případě nekonečně velký vstupní odpor (nulové vstupní proudy aby neovlivňovali okolní zapojení operačního zesilovače), nulový výstupní odpor, nekonečně velké zesílení a mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem nulové napětí. V praxi to ovšem nelze splnit, zesílení reálného operačního zesilovače chceme co největší. V praxi se používá invertující a neinvertující zapojení operačního zesilovače. Invertující zapojení se užívá nejčastěji. Výstupní napětí je násobeno zápornou zpětnou vazbou. Zesílení je tedy závislé na poměru odporů zpětnovazebního a vstupního. Neinvertující zapojení nemění fázi vstupního signálu. Zesílení je vždy větší než 1. Vstupní impedance se blíží k nekonečnu. [5]

## **2.3 Kmitočtové filtry**

Kmitočtové filtry jsou lineární elektronické obvody, které se vyskytují v mnoha elektronických zapojeních. Jejich úkolem je buď potlačit, nebo propustit určitou kmitočtovou složku. Tuto činnost vyjadřujeme modulovou kmitočtovou charakteristikou, jinak řečeno závislost modulu napěťového přenosu na kmitočtu. Důležitou vlastností kmitočtových filtrů je mezní kmitočet, který udává, od jaké frekvence se bude propouštět, nebo potlačovat vybraný signál. V případě pásmové propusti a pásmové zádrže mezní kmitočet udává okolí propouštěného nebo zadržovaného signálu. Uvedeme si tedy hlavní metody realizace filtrů – dolní propust, horní propust, pásmová propust a pásmová zádrž. Dolní propust je určena pro propuštění všech frekvencí nižší než je mezní kmitočet  $f_m$ . V elektroakustice se používá výhradně pro nízké kmitočty, tedy „hloubky“ (basový reproduktor). Horní propust naopak propouští kmitočty vyšší než je mezní kmitočet  $f_m$ , jinak řečeno „výšky“ (výškový reproduktor). Pásmová propust propouští kmitočty okolo mezního kmitočtu  $f_m$ , tudíž „středů“. Nejjednodušší kmitočtovými filtry jsou typu RC, tj. tvořenými rezistorem a kondenzátorem. Lze z nich vytvořit všechny uváděné propusti. Další jednoduchou variantou jsou filtry typu LC, ty vzniknou spojením cívky a kondenzátoru. Také lze s nimi vytvořit různé propusti, používají se, pokud vyžadujeme strmý průběh frekvenční charakteristiky. Příkladem LC filtrů může být také reproduktorová výhybka. [6] [7]

## **2.4 Reproduktorové výhybky**

Reproduktorová výhybka se skládá z jednoho vstupního obvodu a minimálně dvěma výstupy, který dělí přivedený signál na několik frekvenčních pásem, lidově řečeno „basy“, „středů“, „výšky“. Tyto tři pásma nejsou pokaždé, máme několik druhů výhybek např. pro


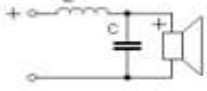
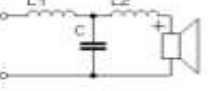
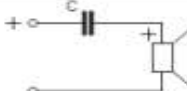
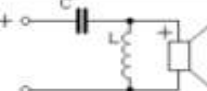
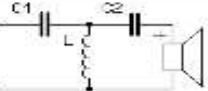
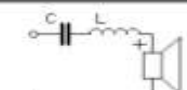
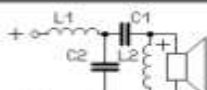
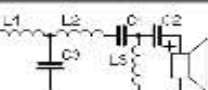
„středobasy“ a „výšky“. Nejdůležitějším parametrem k popisu výhybky je dělicí frekvence  $f_0$ , na kterých se v podstatě rozdělují pásma. Kvalitnější výhybky mají možnost jemného nastavení amplitudy signálu v jednotlivých pásmech a kompenzaci frekvenční závislosti impedance reproduktorů. Výhybky obsahují kmitočtové filtry typu horní propust, dolní propust, nebo pásmovou propust, která je složená z filtrů jednodušších. Dolní propust omezuje vyšší frekvenci, horní propust tlumí nižší frekvenci; záleží, jak je nastavena dělicí frekvence. Pomocí jediné součástky lze realizovat jednoduchý filtr – kondenzátorem horní propust a cívkou dolní propust, filtr by měl mít teoreticky strmost 6 dB/oct (decibel na oktávu). Strmost představuje útlum filtrů, v podstatě se dá říct, o kolik decibelů se zmenší signál na dané frekvenci  $f_1$ , která je definovaná dělicí frekvencí. U dolní propusti je frekvence  $f_1$  dvakrát vyšší, nebo poloviční u horní propusti, než dělicí frekvence  $f_0$ . Výhybky rozdělujeme na aktivní a pasivní. Nejpoužívanější jsou pasivní, neboť nepotřebují ke své činnosti napájecí napětí. Většinou se umísťují vevnitř reprosoustavy mezi zesilovač a reproduktory (poté potřeba součástky dimenzované pro maximální výkon uvažovaného zesilovače), neobsahují žádné ovládací prvky a jsou konstruovány kombinací kondenzátorů a cívek, některé obsahují i ochranný odpor. Aktivní reproduktorová výhybka, také označovaná jako „crossover“ (crossover v angličtině je obecně označován jako signálová výhybka) oproti pasivní výhybce vyžaduje napájecí napětí, obsahuje ovládací prvky, bývá součástí aktivního subwooferu. Je určena k „doladování výhybky“, tzn. nastavení dělicích frekvencí, zisk na konkrétních pásmech, atd. Aktivní výhybka potřebuje pro každé své pásmo samostatný zesilovač (je zapojená mezi nízkofrekvenčním signálem a zesilovači). [16]

V praxi se používají filtry typu Bessel, Buterworth a Linkwitz – Riley. Reálný reproduktor představuje impedanci indukčního charakteru. To můžeme předejít např. programovým vybavením (rozladovat výhybku).

Nejčastěji se používají výhybky se strmostí 12 dB/oct, které jsou nejlepším kompromisem z hlediska frekvenční a fázové charakteristiky, oddělení jednotlivých pásem, směrové charakteristiky v oblasti dělicího kmitočtu a ceny. Jednodušší výhybky 6 dB/oct se používají v nejlevnějších HIFI soustavách, také v basových reproduktorech ve funkci dolní propusti, potřebují ale kvalitní reproduktory (nemají převýšení na horním okraji pásma). Výhybky u vysokotónových reproduktorů často pracují se strmostí 18 dB/oct (minimálně 12 dB/oct). Mezi výhody pak patří lepší potlačení složek signálu pod dělicím kmitočtem, menší zatížení reproduktoru a tím i nižší zkreslení. Naopak pokud je strmost příliš vysoká, nastanou příliš velké fázové posuny a tím i také zkreslení, pak musíme volit kompromis. Zvýšením strmosti tedy můžeme snížit spodní dělicí kmitočet. Vhodná kombinace pro třípásmový systém je 12/12/18 dB/oct.

Praktický návrh výhybky není snadný problém, u řešení tohoto elektrického obvodu se musíme spíše zabývat problémem akustickým, kde se musí přičíst řešení ozvučnice. Výhybku můžeme navrhnout v podstatě dvěma způsoby. První se zabývá vytvořením obvodového modelu výhybky a její zátěže a ten se pak „doladuje“ na příslušném programu. Druhý způsob vychází z návrhu výchozí podoby výhybky ze známých vzorců, poté se vytvoří ze součástek funkční model, z výsledků měření a následném poslechu se postupně model upravuje na výsledný žadáný. Nastává nevýhoda, že návrh je vymyšlen na čistě odporovou zátěž reproduktoru, reproduktor má však komplexní charakter, nezůstane nám nic jiného, než výhybku dále doladovat, měřit a poslouchat. [20]



	6 dB / oct.	12 dB / oct.	18 dB / oct.
dolní propust LP			
	$L = \frac{Z_s}{2\pi f_{sl}}$	$L = \frac{Z_s}{\pi f_{sl}}, C = \frac{1}{4\pi f_{sl} Z_s}$	$L_1 = \frac{Z_s}{4\pi f_{sl}}, C = \frac{2}{3\pi f_{sl} Z_s}, L_2 = 3L_1$
horní propust HP			
	$C = \frac{1}{2\pi f_{sh} Z_s}$	$L = \frac{Z_s}{\pi f_{sh}}, C = \frac{1}{4\pi f_{sh} Z_s}$	$C_1 = \frac{1}{3\pi f_{sh} Z_s}, L = \frac{3Z_s}{8\pi f_{sh}}, C_2 = 3C_1$
pásmová propust BP			
	$C = \frac{1}{2\pi f_{sl} Z_s}, L = \frac{Z_s}{2\pi f_{sh}}$	$f_3 = f_{sl} \sqrt{\frac{f_{sh}}{f_{sh} - f_{sl}}}, f_4 = f_3 \frac{f_{sh} - f_{sl}}{f_{sl}}, L_1 = \frac{Z_s}{\pi f_3}, C_2 = \frac{1}{4\pi f_4 Z_s}, L_2 = \frac{Z_s}{\pi f_3}, C_1 = \frac{1}{4\pi f_4 Z_s}$	$f_3 = f_{sl} \sqrt{\frac{f_{sh}}{f_{sh} - f_{sl}}}, f_4 = f_3 \frac{f_{sh} - f_{sl}}{f_{sl}}, L_1 = \frac{Z_s}{4\pi f_3}, L_2 = 3L_1, C_1 = \frac{2}{3\pi f_4 Z_s}, C_2 = \frac{1}{3\pi f_3 Z_s}, C_3 = 3C_1, L_3 = \frac{3Z_s}{8\pi f_3}$

Obr. 1: Příklady různých propustí a jejich výpočtů

[20]

## 2.5 Reprosoustavy

Reprosoustavu vybíráme podle velikosti plánovaného ozvučovaného prostoru, skladnosti skříně a v neposlední řadě také podle kvality. Přednostně vybíráme ušima a ne očima. Teoreticky postačí pro běžné ozvučení místnosti 4x4 m soustava výkonem 60 W RMS / 8 Ω. Existují na trhu výkonné soustavy, které zahrají lépe různé špičky. Jejich basový reproduktor má větší membránu, tím se bohužel zhorší jeho dynamické vlastnosti. Volíme tedy soustavu výkonně odpovídající plánovanému ozvučovanému prostoru. Při vysoké hlasitosti se objeví špičky výkonu např. 100 W, čímž je pro nás určující cesta k výběru zesilovače. V profesionálním ozvučování se výkonově pohybujeme i v kW. Nastává otázka, zda můžeme připojit 8 – ohmové soustavy na 4 - ohmový zesilovač. Lze to takhle připojit, naopak se nedoporučuje, protože by jsme zatěžovali zesilovač a mohlo by dojít k přetěžování a zničení zesilovače. Samozřejmě výstupní kmitočtová charakteristika soustavy by měla být vyrovnaná v celé akustické ose i mimo ní.

Reprosoustava navrhujeme tak, aby každý reproduktor pracoval optimálně a reprodukováný signál odpovídal přiváděnému signálu. Reproskřín by měla být bez nadsázky vyrobena „z betonu“, stěny při reprodukci nesmí kmitat. Pokud stěny kmitají, stávají se sami novým zdrojem různých pazvuků, přinášejí do reprodukováného zvuku nepříjemné drnění

atd.. Řeší se to opatřením výztuhami jakož jsou příčky, vzpěry nebo žebra na stěnách nejčastěji pro velké a zeslabené plochy. Skříň se nejčastěji vyrábí z dřevovláknitové desky, překližky, neměla by obsahovat spáry, soustavy určené pro domácí použití jsou opatřeny deskou MDF. Profesionální reprosoustava musí vypadat kvalitně a profesionálně, jsou pokryty speciálním kobercem, vybaveny rukojeťmi, ochrannými rohy a gumovými nožkami. Domácí reprosoustavy jsou pokryty nejčastěji dýhou, nebo fólií imitující dřevo, nežádoucí rezonance do podlahy jsou odstraněny použitím odhmoťňovacích jehel.

Reproduktorová soustava by měla být postavena tak, aby výškový reproduktor byl ve stejné výšce našich uší při normálním poslechu. Při reprodukci vzniká ve skříni stojaté vlnění, při němž vzduch vybuzený membránou basového reproduktoru kmitá na kmotočtech, které jsou určeny vnitřními rozměry ozvučnice. Stojaté vlnění omezujeme materiálem s vysokým činitelem pohltivosti, který umísťujeme nejvíce uprostřed skříně a nejméně na stěnách ozvučnice. Tento materiál má i negativní účinky ve formě pohlcování užitečné zvukové energie na nízkých kmotočtech. Týká se to hlavně bassreflexu, kde se sníží akustický tlak na rezonanční frekvenci a to je pro nás nežádoucí, snažíme se naopak účinnost vyzařování bassreflexem zvýšit. Je tedy vhodné volit kompromis. Dalo by se říct, že se jako tlumící materiál hodí polyamidové rouno (vatelín) nebo minerální vlákno, nebo jiný materiál, který je levný, hygienický, dostatečně pohltivý a nejlépe nehořlavý.

Je několik druhů reprosoustav podle použití, v profesionálním ozvučování se setkáváme s basovými, kytarovými, satelitními, kompaktními boxy, s různými druhy ozvučnic, záleží na použití (diskotéky, zpěv, ozvučení menší haly, atd.). Do oddělení HIFI řadíme dvě skupiny reprosoustav – regálové soustavy (instalují se na stojan) a sloupové soustavy (pokládají se na zem). Reprosoustavu připojujeme k zesilovači v profesionálním využití konektory typu XLR (Canon), Jack a Speacon. U obecného domácího používání se volí šroubovatelné a pérkové svorky.

Konstrukce reproduktorové soustavy závisí tedy na finančních možnostech konstruktéra a na jeho šikovnosti. Není na místě šetřit na určitých částech, jakož je např. konstrukce ozvučnice, nebo použití nekvalitních reproduktorů, pak si s takovou neuvážeností zkažíme celou reprosoustavu. Jako dobrý příklad bych uvedl firmu DEXON, která nabízí nejen velmi kvalitní reprosoustavy, ale také celý sortiment ozvučovací techniky. [21] [19]

## **2.6 Ozvučnice reprosoustavy**

Obvykle je žádoucí upravit vyzařování reproduktorů a na to je určena ozvučnice, která v podstatě zvětšuje impedanci mezi přední a zadní stranou membrány reproduktorů, tím se omezí nebo odstraní akustický zkrat, který by způsobil omezení vyzařování na nízkých frekvencích. Existují i ozvučnice s bassreflexem, u kterých se využívá i vyzařování zadní strany membrány. Ozvučnice nesmí v žádném případě ovlivňovat zvuk vlastními kmity, musí být tuhá. Vyrábí se z mnoha materiálů, vhodné jsou např. dřevovláknovité desky, překližky, MDF, plasty, nebo tvrzený papír, můžeme se setkat i s materiálem jako je beton, pěnový polystyren a další. Pokud by byla ozvučnice z fyzikálního hlediska ideální, byla by to nekonečná rovinná deska s připevněným jediným reproduktorem, který by pokrýval celé akustické pásmo. Prakticky to samozřejmě nelze splnit, proto jsou reproduktory instalovány do skříní, beden, které napomáhají při reprodukci zvuku nedokonalým reproduktorům. Nejjednodušeji provedená ozvučnice je vzduchotěsně uzavřená, složitější má různé akustické obvody určené k použití úpravy, odrazu, zesílení či potlačení určitých částí zvuku. Bassreflex je nejjednodušší a nejznámější typem akustického obvodu, který slouží k reprodukci nízkých

kmitočtů obsažený v subwooferech (součást domácího kina). Dále se také používají částečně otevřené ozvučnice (např. kytarová komba atd.). [18] [21]

## 2.7 Reprodukory

Reprodukory hrají jednu z nejdůležitějších rolí naší soustavy, proto si vybíráme hlavně kvalitní a ne jen dobře vypadající. Kdyby jsme chtěli ušetřit na reproduktorech, zkazíme celou soustavu a nezachráníme ji ani všelijaké vylepšování výhybek a korekčních obvodů. Uvedeme si tři základní reproduktory – hlubokotónový, středotónový a vysokotónový reproduktor.

Hlubokotónový reproduktor s větším reproduktorem mívá lepší přenos na nízkých kmitočtech, ale požaduje větší ozvučnici než menší. Menší hlubokotónový reproduktor má ale lepší přenos na středních a vysokých kmitočtech lepší dynamické vlastnosti (vhodné k reprodukci zpěvu). Při výběru hlubokotónového reproduktoru se musíme zajímat o maximální akustický tlak  $L_m$ , který se obvykle neuvádí, můžeme si ho ovšem spočítat ze vzorce  $L_m = \text{citlivost} + 20 \cdot \log \text{zátížitelnost}$ , z tohoto vzorce dostaneme názorné informace. Dále by jsme se měli zajímat o průměru kmitací cívky. Kmitačka se během reprodukce ohřívá a tím vzrůstá její odpor, výsledný akustický tlak je jiný než vypočtený. Reprodukory s větší kmitací jsou tímto jevem zvaným termická komprese postiženy méně. Ještě by jsme se u hlubokotónového reproduktoru měli zajímat o maximální lineární výchylce – je to maximální výchylka membrány, při níž má reproduktor ještě přijatelné zkreslení, pak také omezení mechanické výchylky vlivem konečné délky rozvinutí závěsů kmitacího systému (projevuje se poklesem kmitočtové charakteristiky při nízkých frekvencích a velkém buzení – reproduktor musí mít velké rozvinutí závěsu aby docílil vysoký akustický tlak).

Středotónový reproduktor by měl být nejkvalitnější, protože pracuje v kmitočtovém pásmu, ve kterém je lidské ucho nejcitlivější. Také by jsme měli při výběru dbát pozornosti jako u basového reproduktoru. Reprodukory s uzavřeným košem bývají (pracovní objem vytvořen nevystřížením otvorů v plechovém koši) levnější, ale nekvalitní. Nejlépe je si reproduktor vyzkoušet např. kvalitním generátorem sinusovým signálem.

Vysokotónový reproduktor je v profesionálních soustavách většinou tlakový, v HIFI soustavách kalotový. Kalotový typ má nižší zkreslení, vyrovnanější kmitočtovou charakteristiku, vše na úkor menší citlivosti. Ochrana pro citlivý výškový reproduktor poslouží odporový dělič, nebo žárovka, u piezo reproduktorů PTC člen (automatická tepelná pojistka). U tlakových reproduktorů jsou vlastnosti jako citlivost, směrové charakteristiky a mezní kmitočet závislé také na použitém zvukovodu. [22]

Na následujícím obrázku je popis základních částí hlubokotónového reproduktoru.



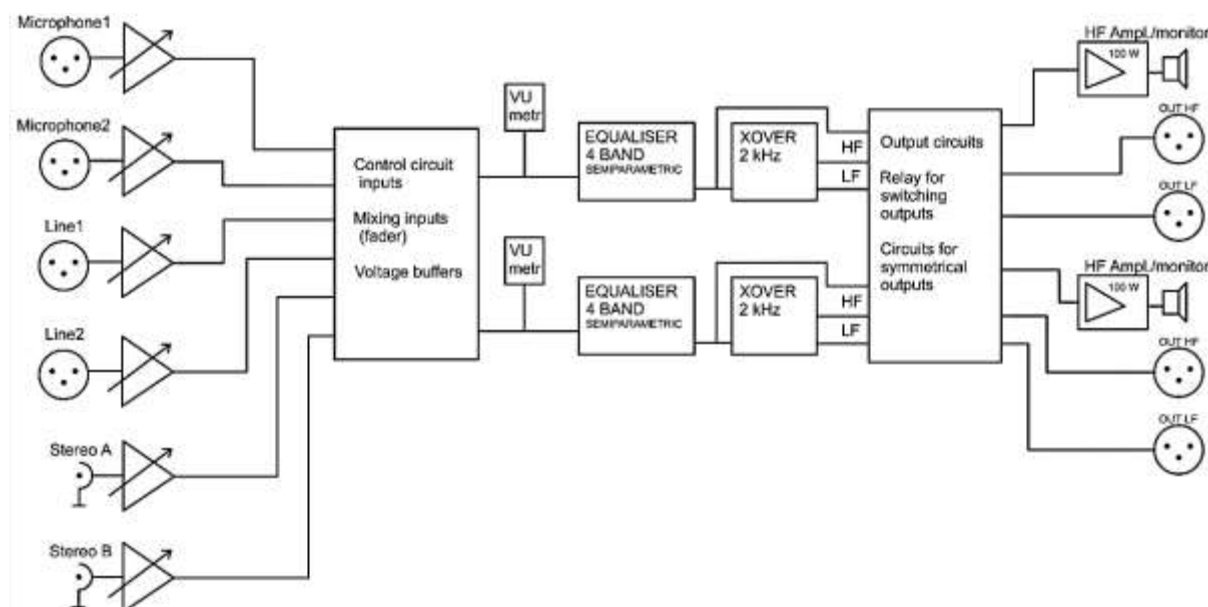
Obr. 2: Ukázka hlubokotónového reproduktoru: A – závěs membrány B – vyzařovací membrána C – středící membrána D – zkratovací prstenec E – připojovací terminál F – magnet G – chladicí otvor magnetu H – kmitací cívka

[22]

Jako první si uvedeme závěs membrány. Vidíme ho jako pár vlnek a je určen k pružnému ukotvení membrány, závěs v podstatě udává i životnost samotné membrány, materiálem je nejčastěji guma, také polyuretan (reproduktory Tonsil). Závěs by měl být optimálně pružný, teplotně a časově stálý. Membrány jsou vyráběny nejčastěji z grafitovaného papíru, polypropylénu. Polypropylén má lepší vlastnosti na horním okraji přenášeného pásma, s výhodou jsou použitelnější do dvoupásmových HIFI soustav. Výškové a středovýškové reproduktory obsahují membrány vyrobené z hliníku a titanu, membrána by měla být dostatečně tuhá a lehká, aby kmitala pístově v nejširším kmitočtovém pásmu. Středící membrána brání k tření cívky o části magnetického obvodu, v podstatě přidržuje kmitací cívku s membránou v ose vzduchové mezery magnetu. Měla by být lehká a prodyšná. Někteří špičkoví výrobci reproduktorů např. firma Beyma zavádějí dvě středící membrány. Zkratovací prstenec je určen ke zmenšení modulace magnetického pole (vliv magnetického pole kmitací cívky). Připojovací terminál by měl být dobře pájitelný, teplotně stálý, kladný pól je většinou označen červeným kroužkem. Nejdůležitější funkcí reproduktoru je magnetický obvod, používá se permanentní magnet, materiálem je nejčastěji ferit, u nejkvalitnějších reproduktorů je použit magnet s příměsí vzácných zemin (Nd). Magnetické pole v mezeře je požadováno symetrické (menší zkreslení). Chladicí otvor slouží k odvodu tepla. Kmitací cívka je nejčastěji navinuta měděným vodičem, špičkové typy obsahují vinutí z plochého poměděného hliníkového vodiče, který zvětšuje účinnost reproduktoru. Pokud si tedy chceme pořídit kvalitní reproduktor, pořádně si prostudujme jeho parametry, také nejsou vždy parametry shodné s uvedenými (různé podmínky při měření různých výrobců atd.). [22]

### 3. VLASTNÍ NÁVRH OZVUČOVACÍ APARATURY

#### 3.1 Blokové schéma



Obr. 3: Blokové schéma ozvučovací aparatury

Předkládaná diplomová práce se zabývá ozvučením menších sálů, proto je nutné přizpůsobit i blokové schéma. Nejprve začneme vstupní částí, která obsahuje dva symetrické mikrofonní vstupy, dva symetrické linkové vstupy a dva stereofonní vstupy. Ty jsou dále zesíleny předzesilovači s volitelným nastavitelným zesílením (k přizpůsobení úrovně vstupních zařízení). Například u mikrofonního předzesilovače je použit integrovaný obvod SSM2019, který je přímo určen pro symetrické vstupy mikrofonního předzesilovače, je kvalitní a nízkošumový. Za předzesilovači jsou obvody pro mixování vstupních obvodů. Vstupní obvody obsahují potenciometry pro regulaci vstupní úrovně každého vstupu a také potenciometry v zapojení typu “fader”. Tento prvek má na starost prolínání vstupů. Vstupní obvody jsou zakončené oddělovači impedance. Oddělovač impedance je v podstatě zapojení neinvertujícího zesilovače, kde požadujeme co největší vstupní impedanci a co nejmenší výstupní. Jeho činnost spočívá v neovlivňování dalších obvodů od obvodů vstupních. Poté následuje VU-metr (Volume Unit), neboli indikátor úrovně zvukového signálu, také indikátor vybuzení. Nejvhodnější je co nejjemnější indikace okolo jmenovité úrovně 0 dB, indikátory s konstantním krokem tedy nejsou vhodné. Čtyřpásmový semiparametrický korektor je podle mého názoru z hlediska složitosti a schopnosti nejvhodnější. Nastavují se zde výšky, hloubky a parametrické dvojité středy. Za korektorem následuje aktivní výhybka na dělicím kmitočtu 2 kHz, ke které můžeme připojit LF a HF výstupy. Výstupní obvody spolu s přepínacím relé a obvody pro symetrický výstupy jsou určeny pro různé výstupy ozvučovací aparatury.

### 3.2 Mikrofonní předzesilovač

I když jsme ve světě digitální hudby, ze snímání zvuku mikrofonem budeme zpracovávat pokaždé analogový signál. Mikrofon tedy musí být hodně kvalitní. Nejpoužívanější dynamické mikrofony mají nízké výstupní napětí (jednotky až desítky mV) při běžné úrovni hlasitosti, vyžadují tedy vysoké zesílení. Zesílením se také zvyšuje nežádoucí šum. Tento problém lze odstranit vstupním transformátorem, ten je ale celkem drahý. Na ochranu proti rušení naindukovaného napětí (dlouhé kabely mikrofону, osvětlovací technika) slouží symetrického vedení, které zpracovává pouze rozdílový signál na obou živých vodičích, nežádoucí naindukovaný signál téměř odstraní.

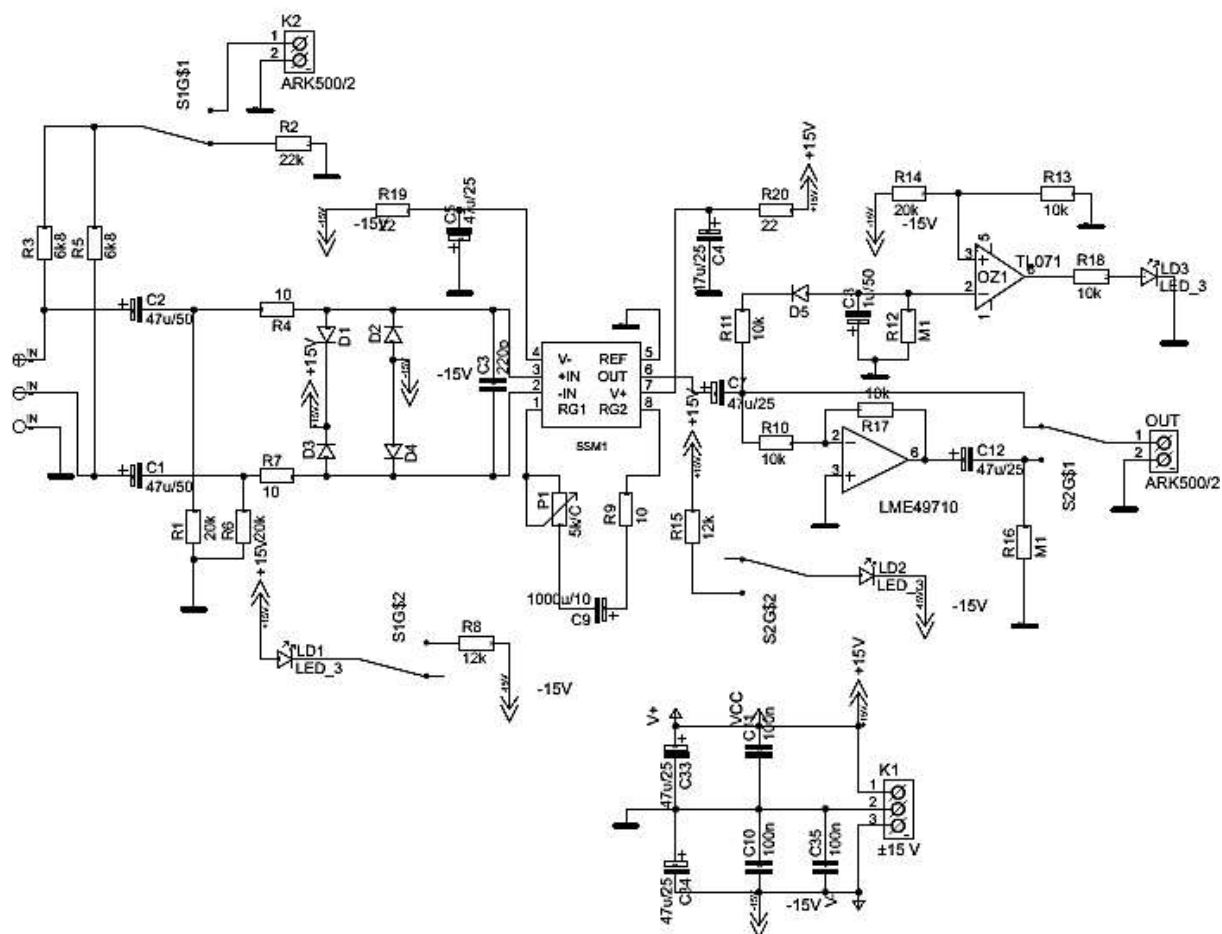
V zapojení je použit velmi kvalitní integrovaný obvod SSM2019 od firmy Analog Devices tvořený přímo pro mikrofonní předzesilovače. Tento integrovaný obvod obsahuje symetrický vstup optimalizovaný na nízkou impedanci mikrofону (dynamický přibližně 200  $\Omega$ ). Zisk se nastavuje potenciometrem P1 (typicky 0 až 60 dB). Předností tohoto obvodu je velmi malý vlastní šum, nízké harmonické zkreslení THD + N a také vysoká rychlost přeběhu (související i velká šířka přenášeného pásma).

Vstup je osazen symetrický konektorem. Na vstup je přes přepínač S1 přivedeno fantomové napětí, které je určeno pro napájení kondenzátorových mikrofónů (indikováno LED D1). Kondenzátory C1 a C2 jsou oddělovací, určené na minimální napětí 50 V. Rezistory R1 a R6 vytváří vstupní impedanci předzesilovače, R4 a R7 jsou ochranné rezistory. Následují čtyři diody chránící vstup proti napěťovým špičkám. Kondenzátor C3 filtruje vysokofrekvenční rušení. Mezi vývody RG1 a RG2 obvodu SSM2019 je připojen potenciometr P1 v sérii s rezistorem R9, slouží k nastavení zisku (stejněsměrně odděleno kondenzátorem C9). Na výstupu obvodu SSM2019 je malá stejnosměrná složka, která je oddělena kondenzátorem C7. K otáčení fáze o 180° slouží invertující obvod LME49710, který připojujeme přepínačem S2 (také indikováno LED D2).

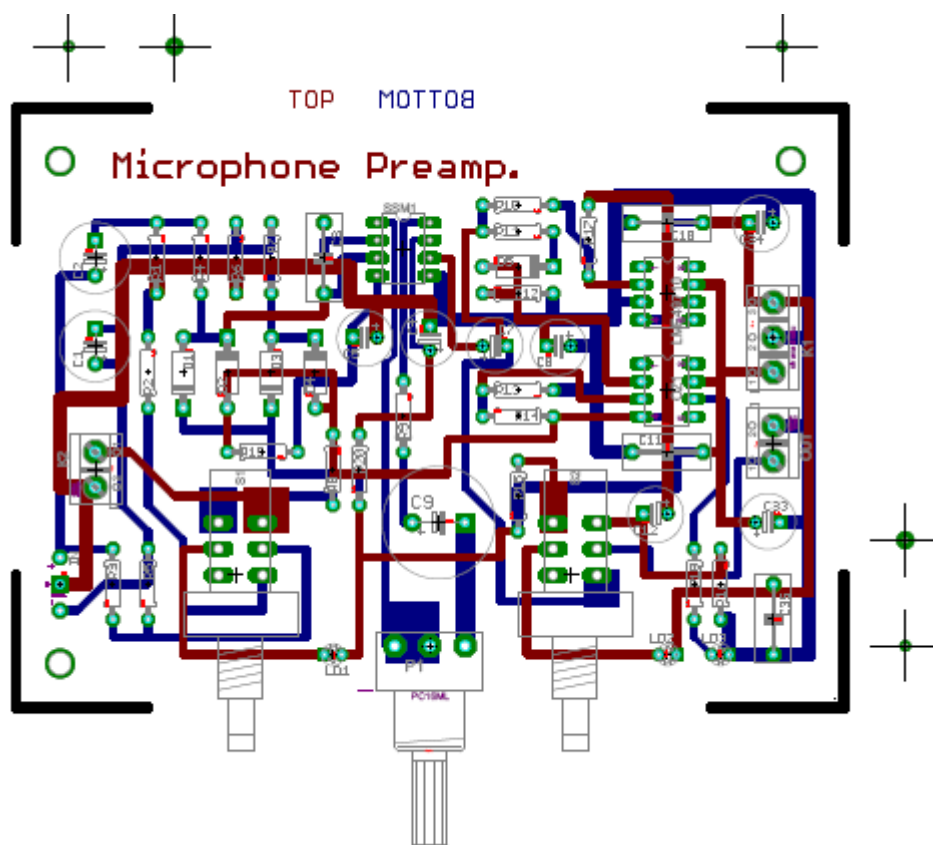
Za diodou D5 chránící proti záporným napěťovým špičkám následuje indikátor přebuzení s integrovaným obvodem TL071. Paralelní kombinace RC členu C8 a R12 spolu s odporovým děličem R13/R14 a komparátorem TL071 indikuje přebuzení tím, že pokud poklesne napětí pod referenční úroveň přibližně -5 V.

Záporné špičky signálu jsou diodou na výstupu předzesilovače přivedeny na paralelní RC kombinaci C8 a R12. Pokud napětí na C8 klesne pod referenční úroveň přibližně -5 V, danou odporovým děličem R13/R14, výstup komparátoru IC3 TL071 se překlápí do vysoké úrovně a LED LD 3 indikuje přebuzení. Citlivost indikátoru je nastavena poměrně nízko, což zaručuje dobrou přebuditelnost. [12]

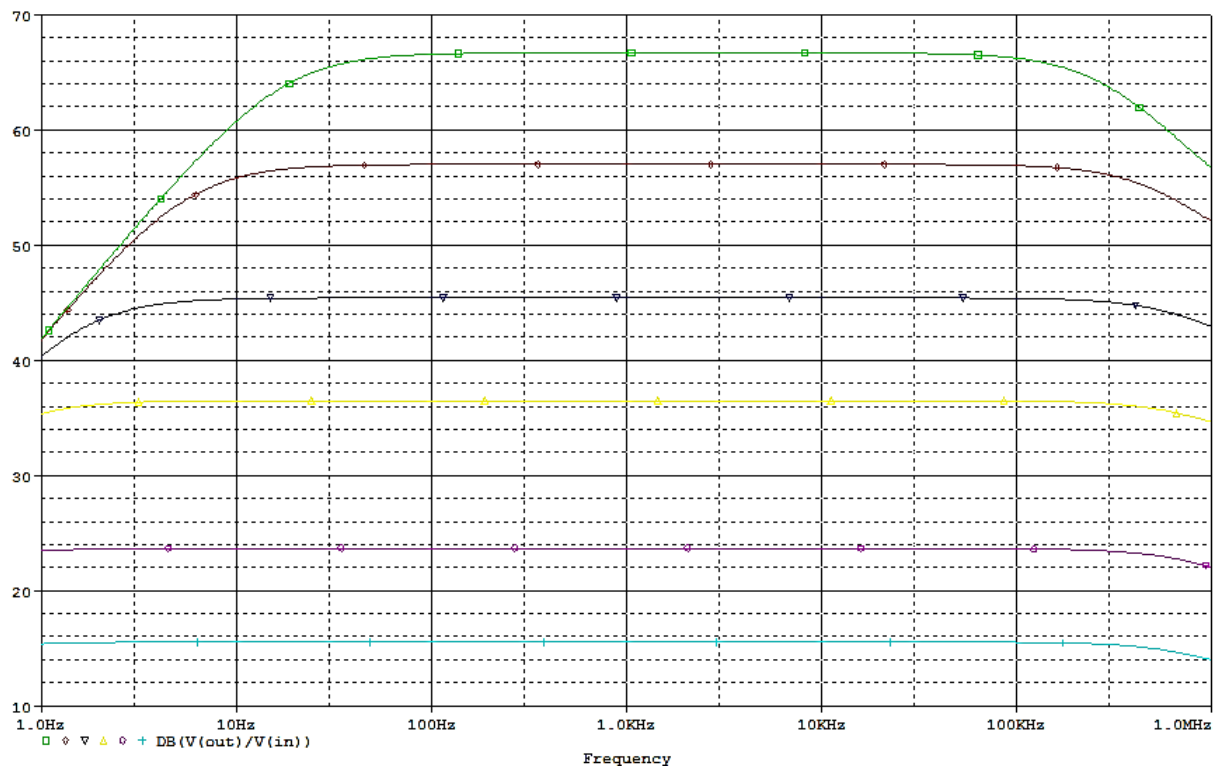
Obvod SSM2019 není součástí knihoven programu Eagle, proto byla vytvořena nová knihovna pro tuto součástku. Napájecí napětí  $\pm 15$  V je filtrováno přes kondenzátory C10, C11, C33, C34 a C35. Zapojení je převzato z Praktické elektroniky [12] a je nakresleno v programu Eagle na následujícím obrázku.



Obr. 4: Schéma mikrofonního předzesilovače

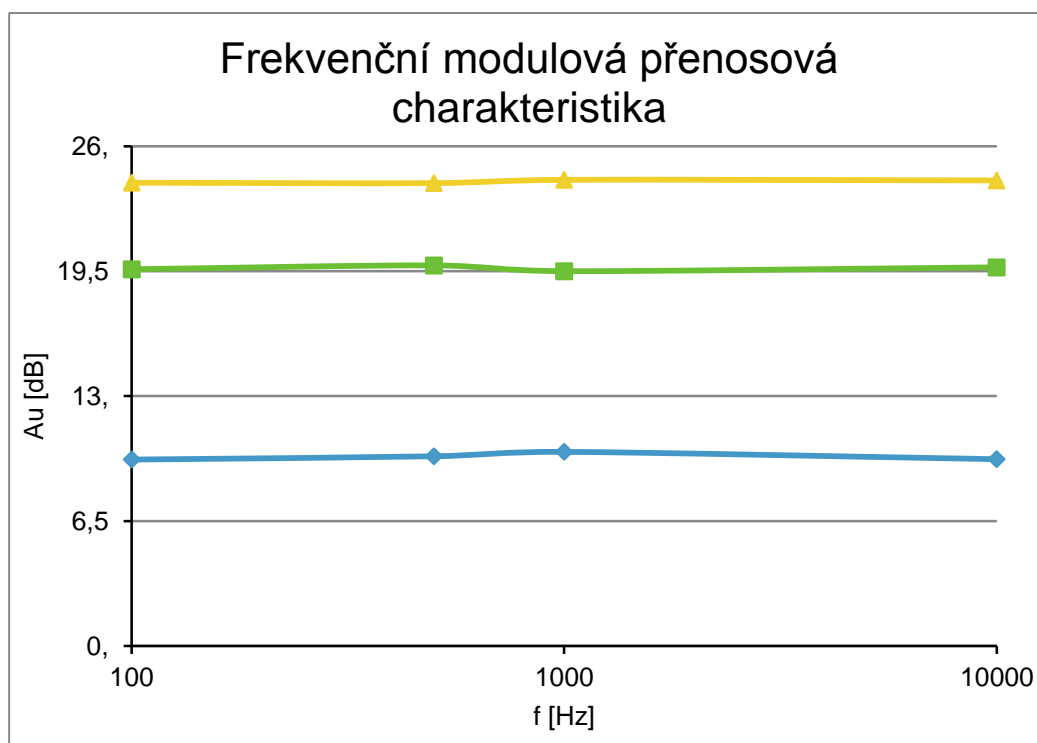


Obr. 5: Deska plošných spojů mikrofonního předzesilovače



Obr. 6: Frekvenční přenosová modulová charakteristika mikrofonního předzesilovače





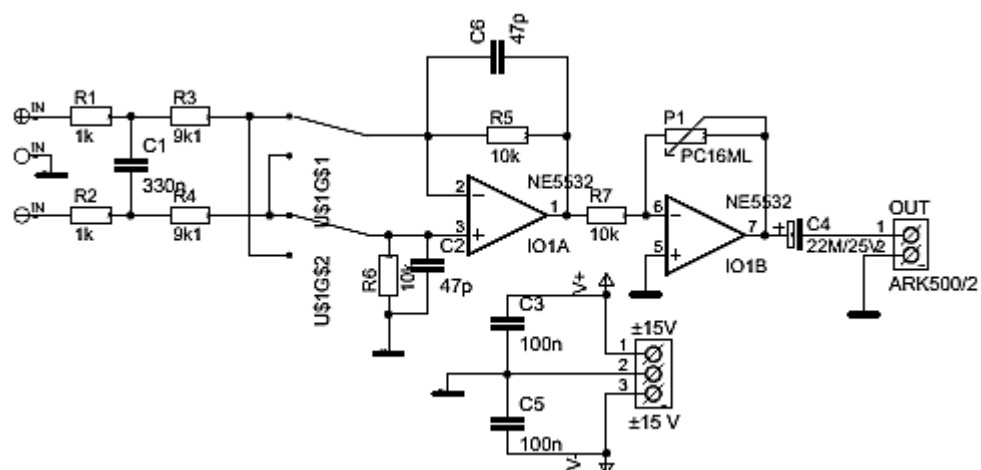
Obr. 7: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika mikrofonního předzesilovače

### 3.3 Symetrický a stereofonní vstup

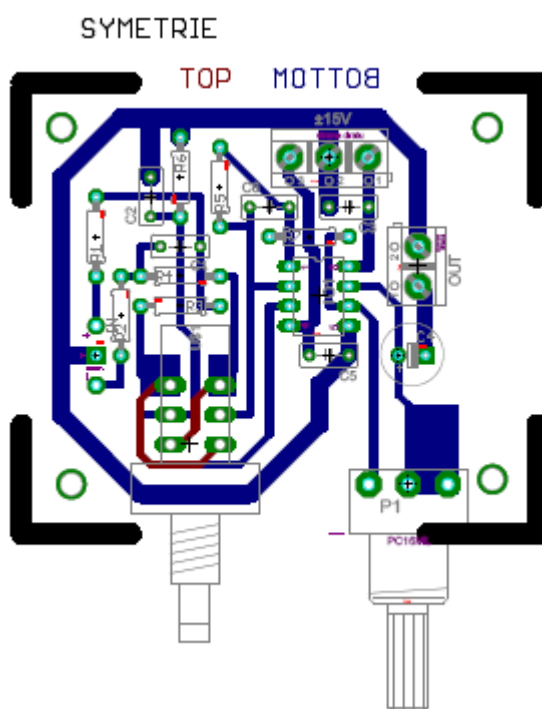
Obvod pro převod symetrického vstupu na nesymetrický je poměrně jednoduchý. Kondenzátor C1 spolu se čtveřicí rezistorů R1 až R4 potlačuje vysokofrekvenční rušení, isostat S1 přepíná fázi. Je zde opět použit běžný dvojitý operační zesilovač NE5532, jeho první část provádí samostatný převod symetrického vstupu a druhá část slouží k regulovatelnému zesílení pomocí poměrem potenciometru P1 a rezistoru R7. Kondenzátory C2 a C6 také filtrují nežádoucí rušení. Napájecí napětí  $\pm 15$  V je filtrováno kondenzátory C3 a C5. [8]

Obvod stereofonního vstupu je také jednoduchý, vstupní odpor je  $47\text{k}\Omega$ , zesílení je také dáno poměrem potenciometru P1 a R1, ve druhém kanále P2 a R3. Napájecí napětí  $\pm 15$  V je filtrováno kondenzátory C5 a C6.

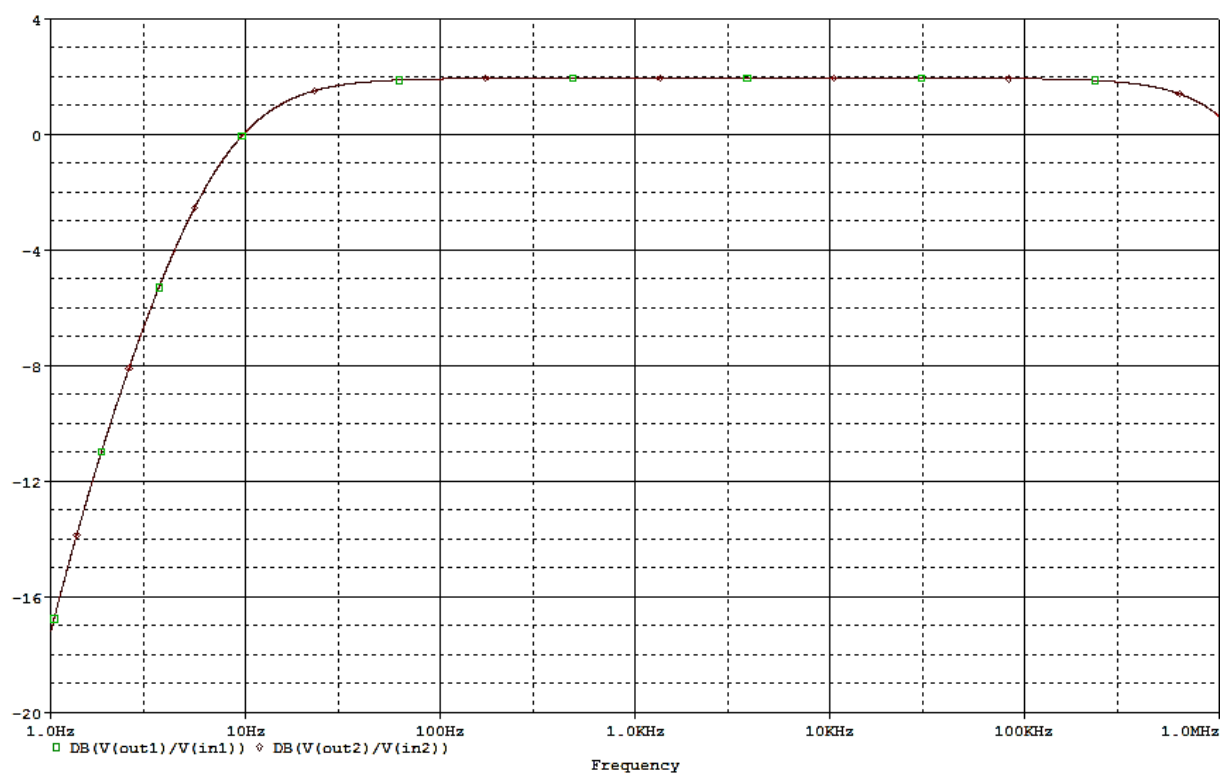
Zesílení obou vstupních obvodů je poměrně dostačující, jak je znázorněno na následujících ukázkách simulací. Měření se provedlo jen pro symetrický předzesilovač, výsledky jsou srovnatelné.



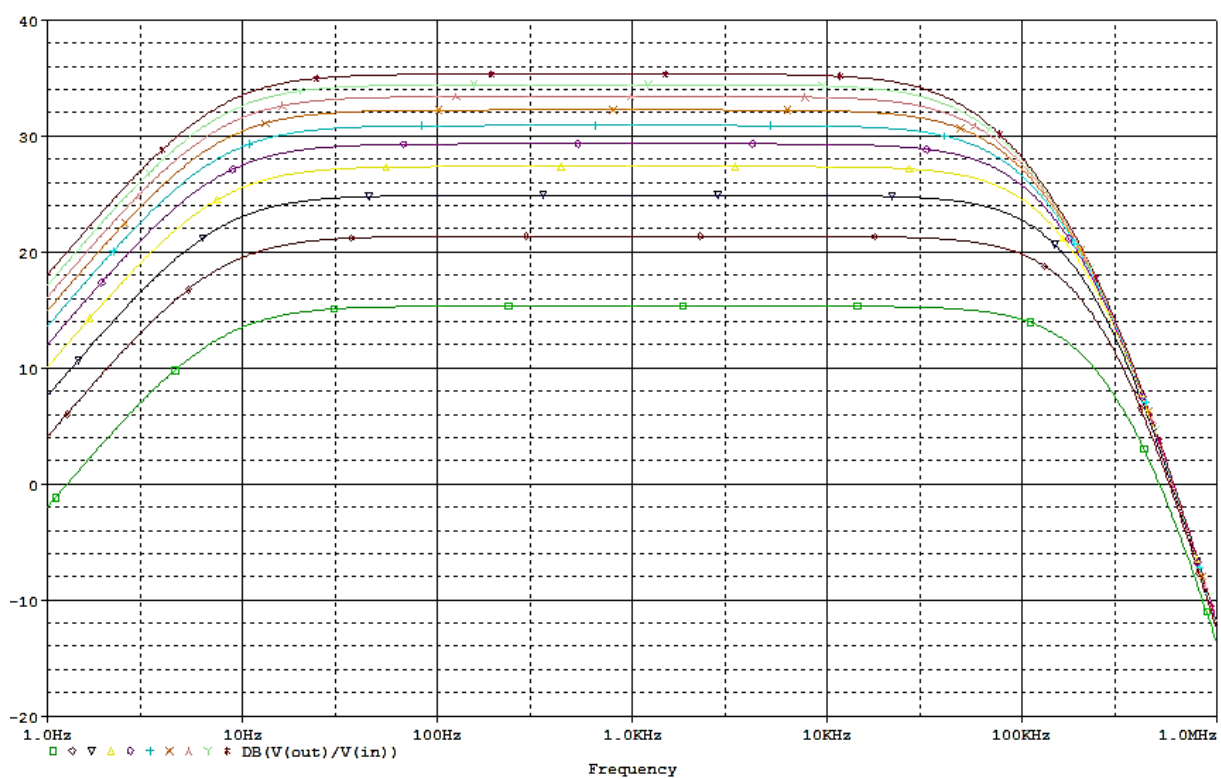
Obr. 8: Schéma převodu symetrického vstupu na nesymetrický výstup



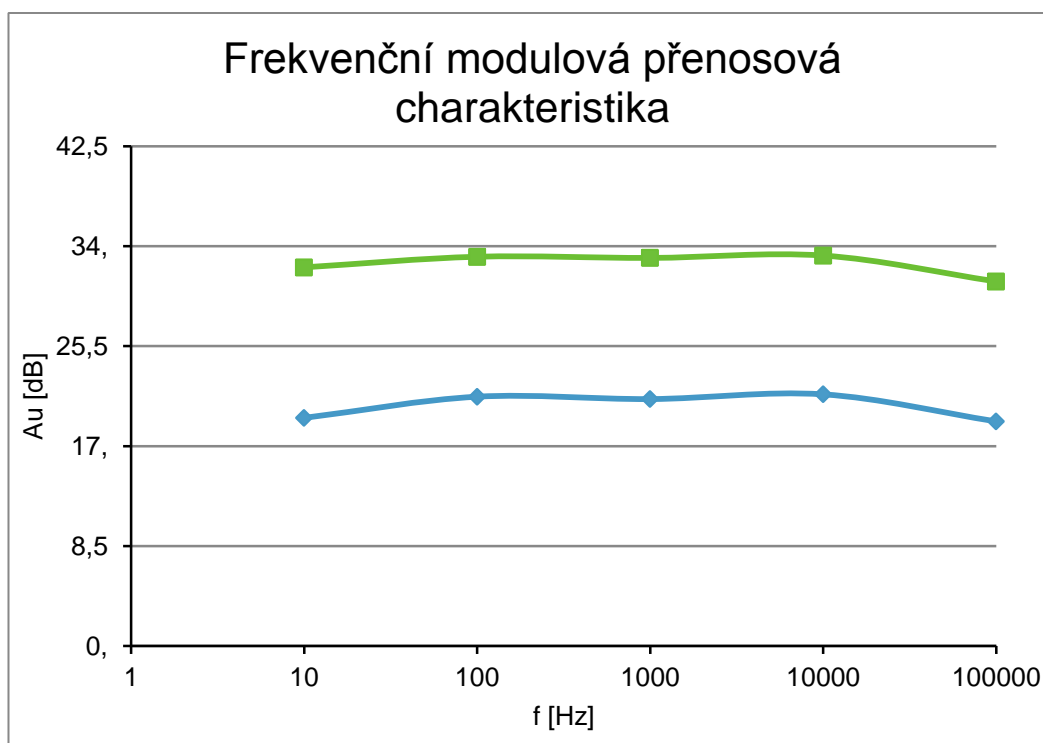
Obr. 9: Deska plošných spojů symetrického předzesilovače



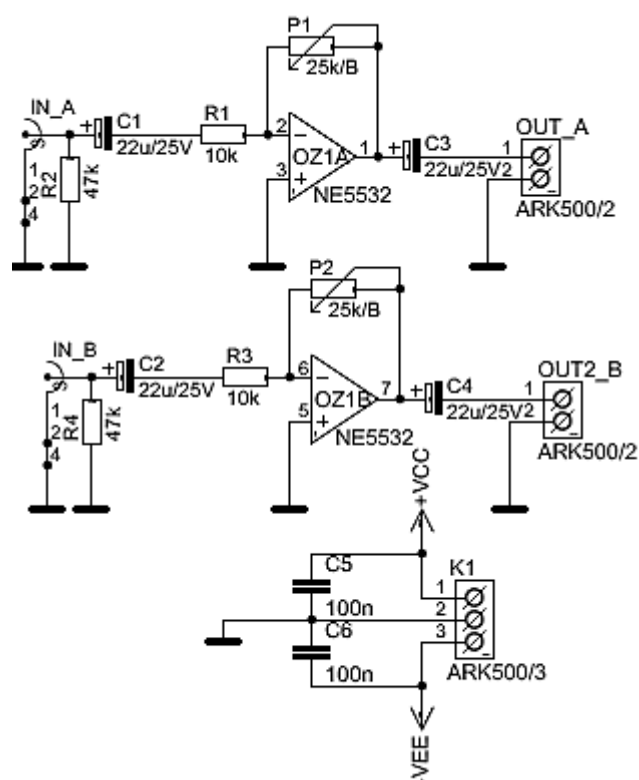
Obr. 10: Frekvenční přenosová modulová charakteristika stereofonního předzesilovače



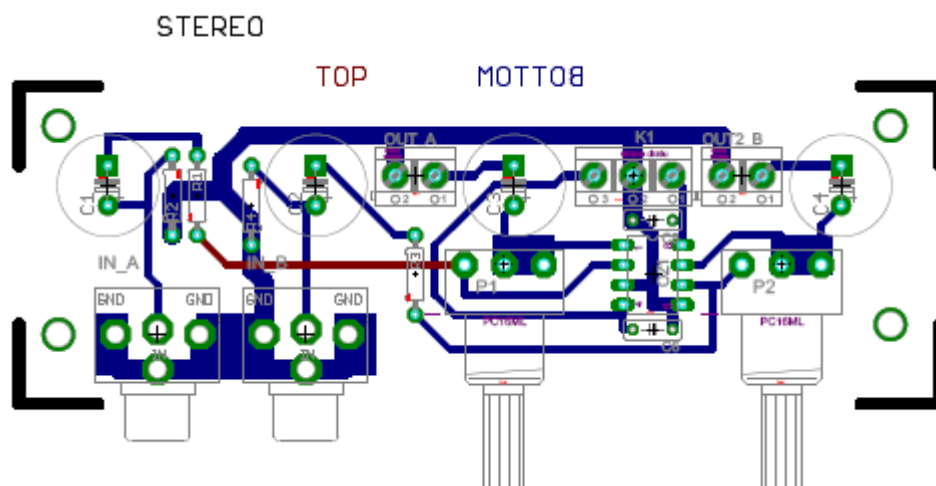
Obr. 11: Frekvenční přenosová modulová charakteristika symetrického vstupu, různé úrovně zesílení



Obr. 12: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika symetrického vstupu, různé úrovně zesílení



Obr. 13: Schéma stereofonního předzesilovače



Obr. 14: Deska plošných spojů stereofonního předzesilovače

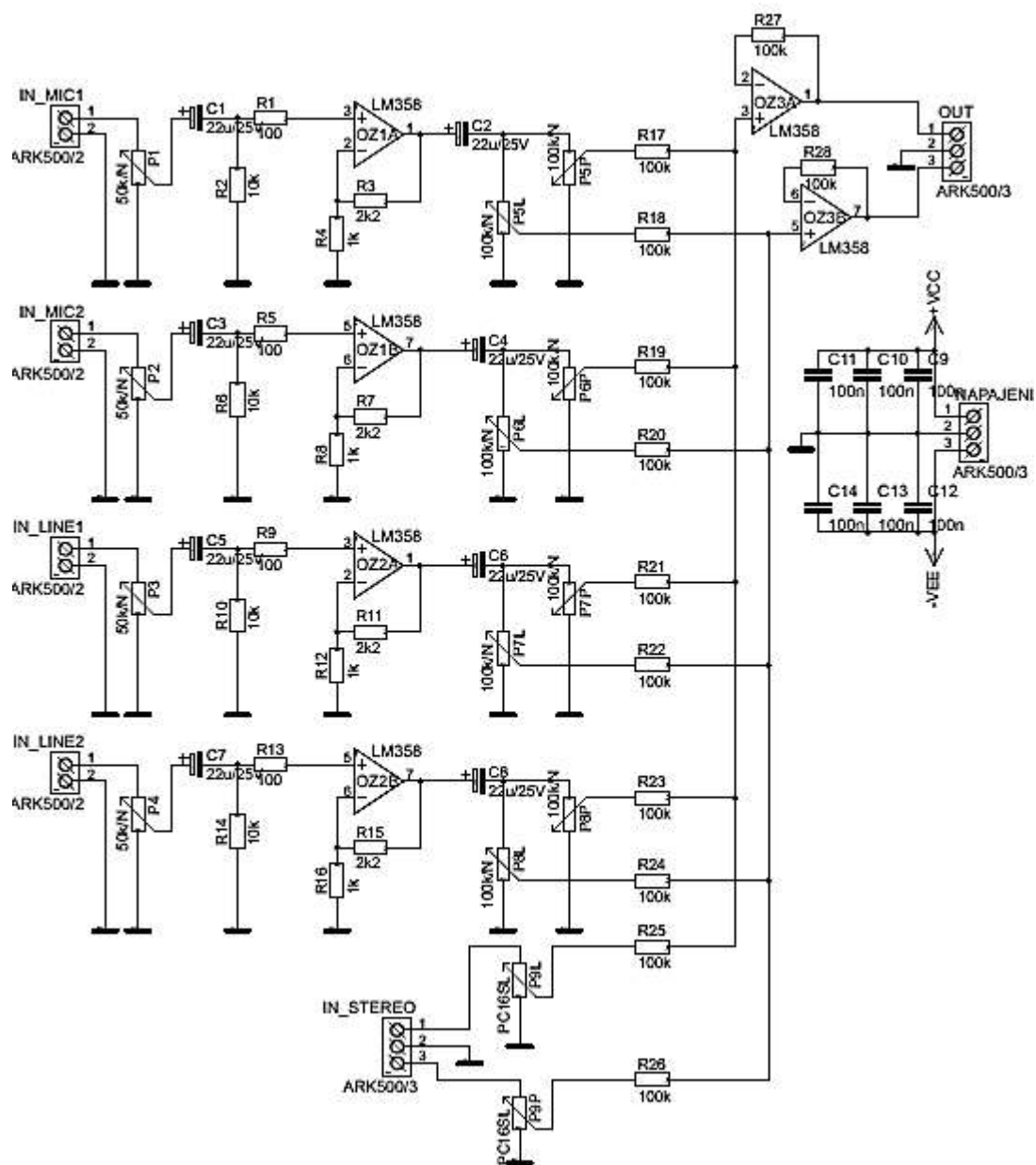
### 3.4 Obvody vstupních regulací

Nedílnou součástí všech mixážních pultů a podobných zařízení je mixování vstupních signálů. Tuto funkci plní zapojení na obr. 15. Zapojení tedy obsahuje pět vstupů, a to dva symetrické mikrofonní, dva symetrické linkové a jeden stereofonní vstup. Funkce všech čtyř vstupů (stereo vstup je pouze regulovan fadery) je totožná, vysvětlení bude tedy např. pro jeden mikrofonní vstup.

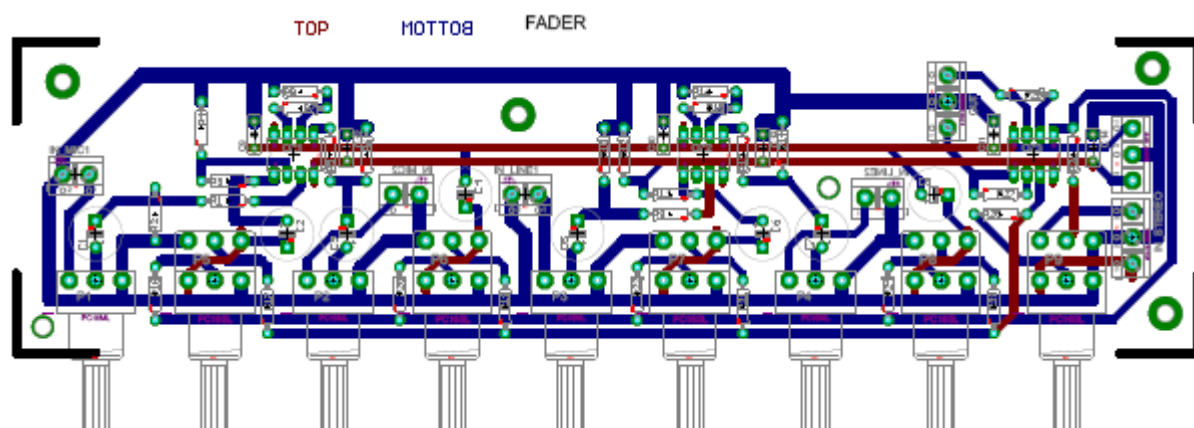
Za vstupním konektorem je potenciometr k regulaci vstupní úrovně. Obvod zesilovače je opět oddělen oddělovacím kondenzátorem. Rezistor R2 plní funkci zatěžovacího odporu pro operační zesilovač OZ1, rezistor R1 potlačuje parazitní oscilace, neslyšitelných kmitočtů. esílení OZ1 je dáno poměrem rezistorů R3 a R4, je tedy přibližně 2. Následuje důležitá část tohoto zapojení, a to zapojení potenciometrů typu “fader”. Slouží k prolínání vstupních signálů, potenciometr je dvojitý a je zapojen proti sobě, tj. pokud je jezdec ve středu, propouští signál do obou vstupů, na kraji jen jeden vstup.

Všechny příspěvky signálů se sečtou v operačním zesilovač OZ3, ten má zesílení rovné jedné (poměr zpětnovazebních a vstupních rezistorů).

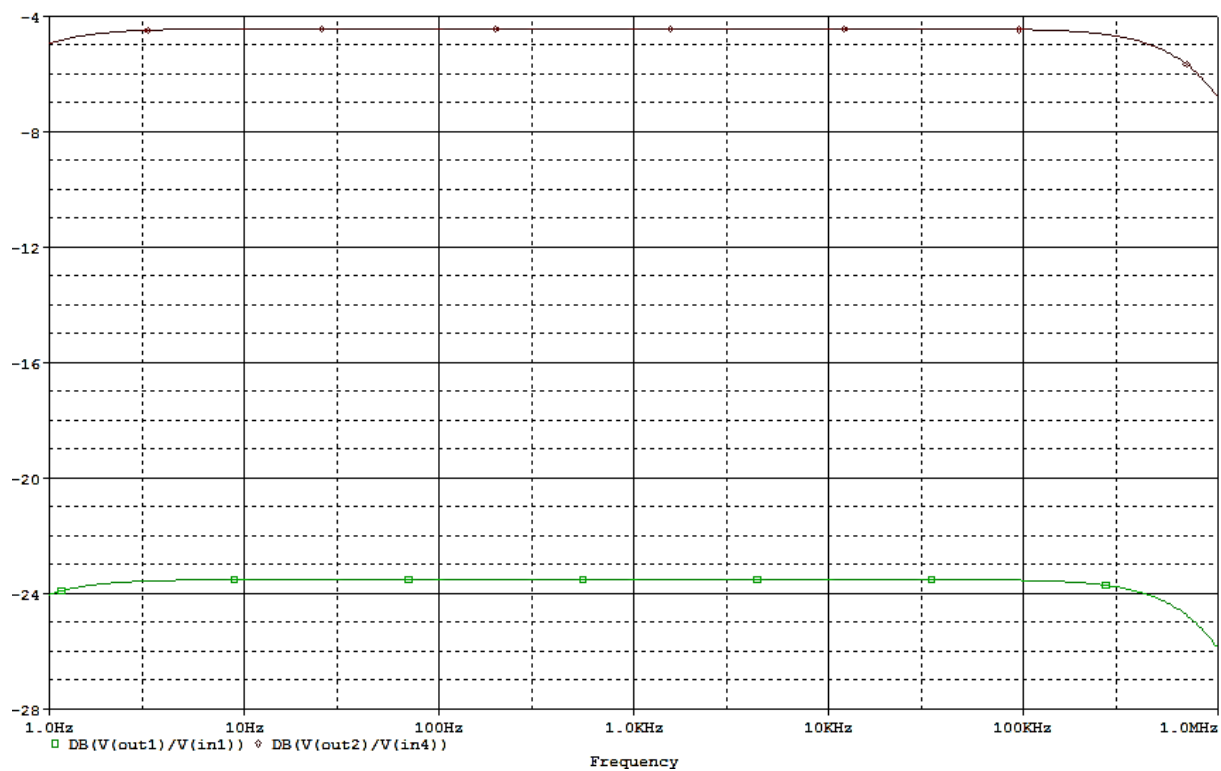
Měřením byla ověřena funkce prolínání vstupů, obvod pracoval správně. Napájecí napětí  $\pm 15$  V je filtrováno kondenzátory C9 až C12. [26]



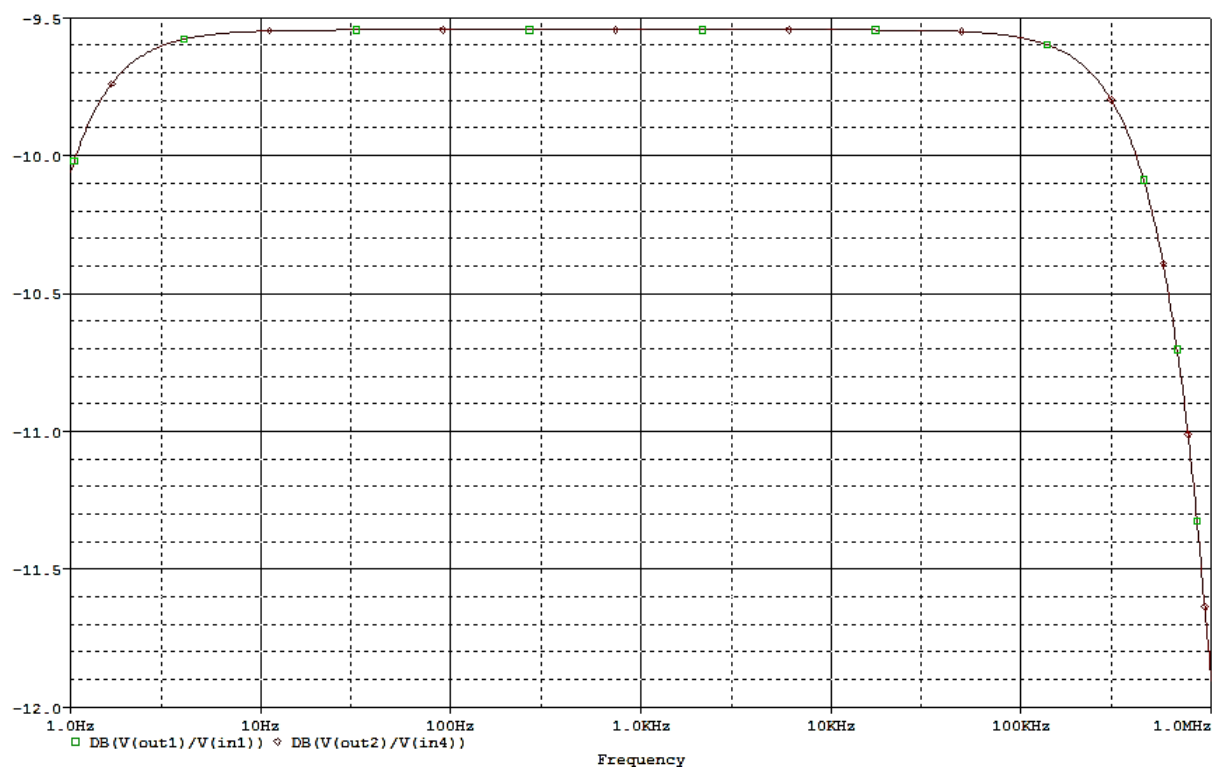
Obr. 15: Schéma obvodů vstupních regulací



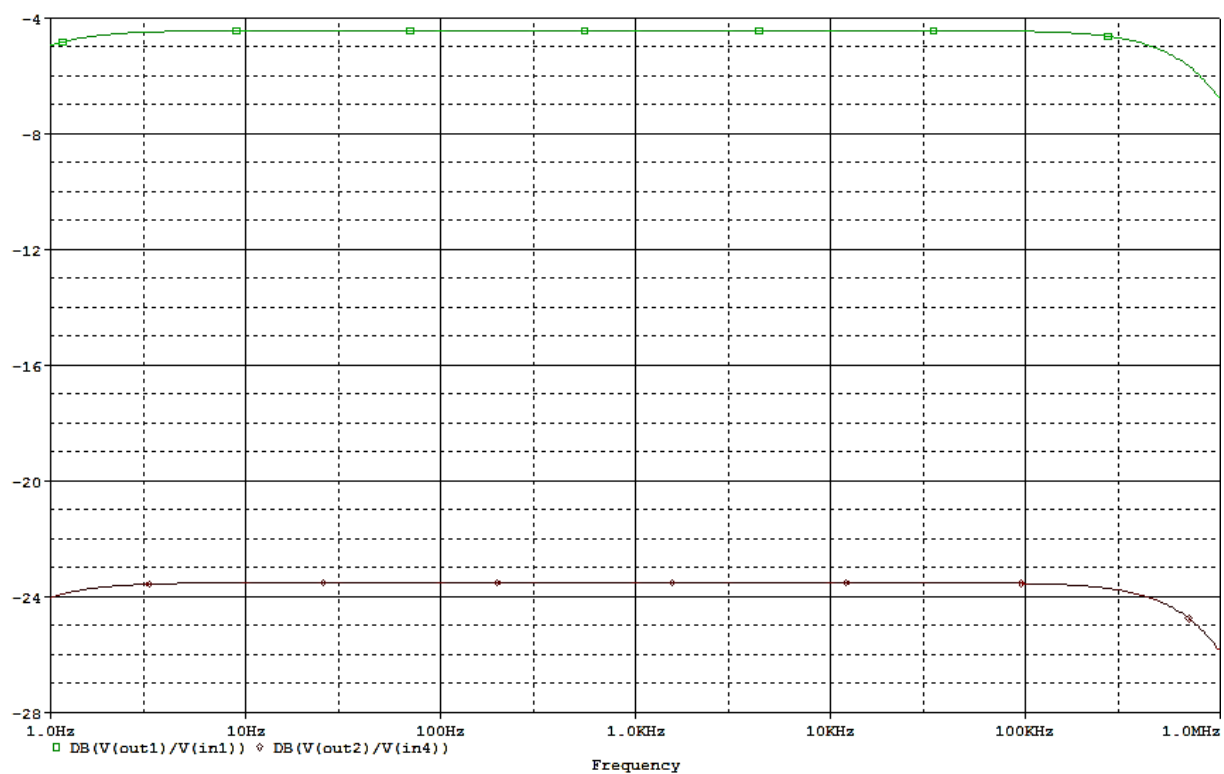
Obr. 16: Deska plošných spojů obvodů vstupních regulací



Obr. 17: Frekvenční přenosová modulová charakteristika vstupních obvodů, nastavení faderu: vrchní potenciometr nastaven na 0,9, spodní na 0,1



Obr. 18: Frekvenční přenosová modulová charakteristika vstupních obvodů, nastavení faderu: oba nastaveny na hodnotu 0,5



Obr. 19: Frekvenční přenosová modulová charakteristika vstupních obvodů, nastavení faderu: vrchní potenciometr nastaven na 0,1, spodní na 0,9



### 3.5 Čtyřpásmový semiparametrický korektor

Korekce dělíme na pasivní a aktivní, v této práci je použit aktivní korektor. Pasivní korekce najdou své příznivce výhradně u kytarových zesilovačů, kde není potřeba mít zcela lineární průběh charakteristiky, jde spíše o zdůraznění některých kmitočtů. Nejčastěji se jedná o modifikace filtru zvaný prezenc, tj. o zdůraznění kmitočtů okolo 2 až 3 kHz (lidské ucho je nejcitlivější v oblasti okolo 1 až 2 kHz).

Prvně bych začal dvoupásmovými korekcemi. Tyto korekce v podstatě více či méně zdůrazňují hloubky a výšky, nejvíce rozšířenými dvoupásmovými korekcemi jsou korekce typu Baxandall, nebo jeho různé modifikace. Oblast použití je výhradně v domácí sféře, kde neklademe vysoké nároky na korekce a reprodukováná hudba je již upravená ve studiu. Jiná situace vznikne při zpracovávání syrového zvukového signálu, nebo při živém ozvučení, tam je na místě co největší možnost nastavení zvuku.

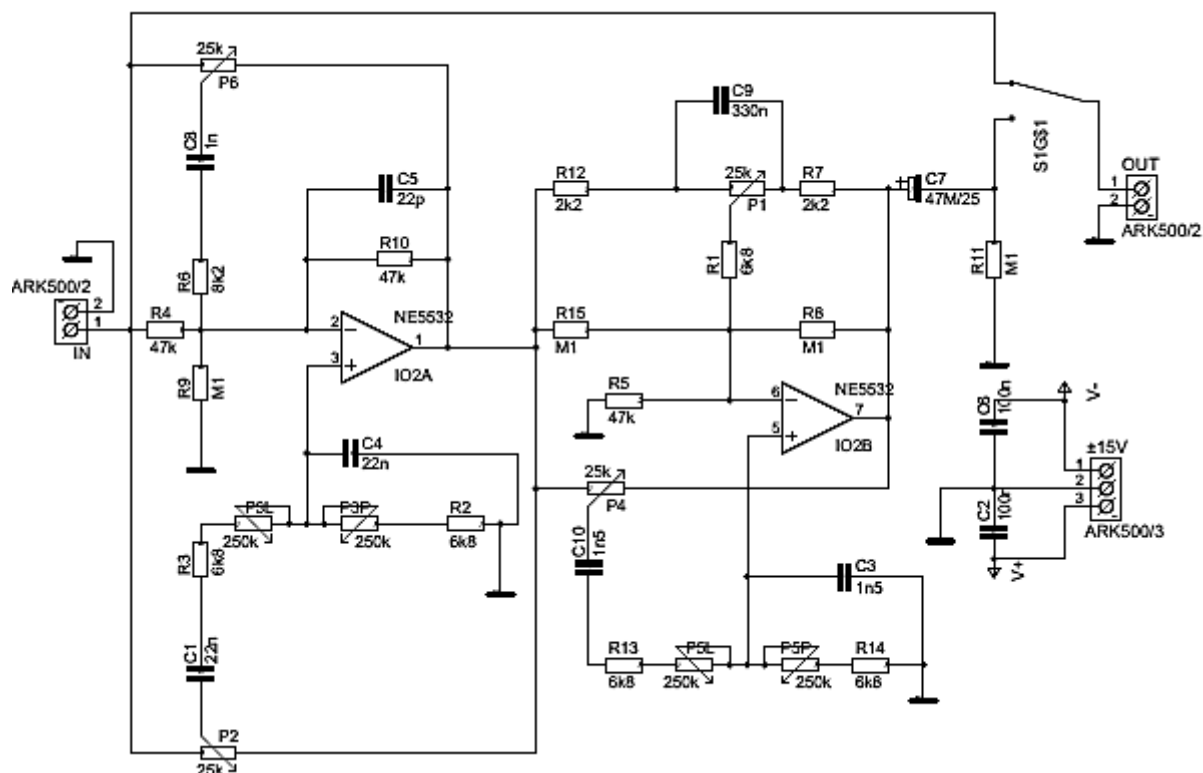
Třípásmové korekce vzniknou přidáním regulací středů. Je také možnost parametrického zpracování.

Korektor obsažený v této práci je čtyřpásmový semiparametrický. Rozdíl mezi parametrickým a semiparametrickým je ten, že parametrický korektor umožňuje nastavit zdvih korekcí na zvoleném kmitočtu, nastavit kmitočet, na kterém korektor pracuje a nastavit šířku pásma – tedy tři nastavovací prvky, semiparametrický korektor nemá nastavení šířky pásma, obvykle se nastavuje střední hodnota, tedy  $B_w = 2$ . Někdy tyto korektory umožňují nastavit dvě, nebo tři pevně dané hodnoty. Nastavení všech tří parametrů pro všechny pásma korektoru se dočkáme u špičkových drahých mixážních pultů, levnější mixážní pulty ztrácejí tyto možnosti nastavení.

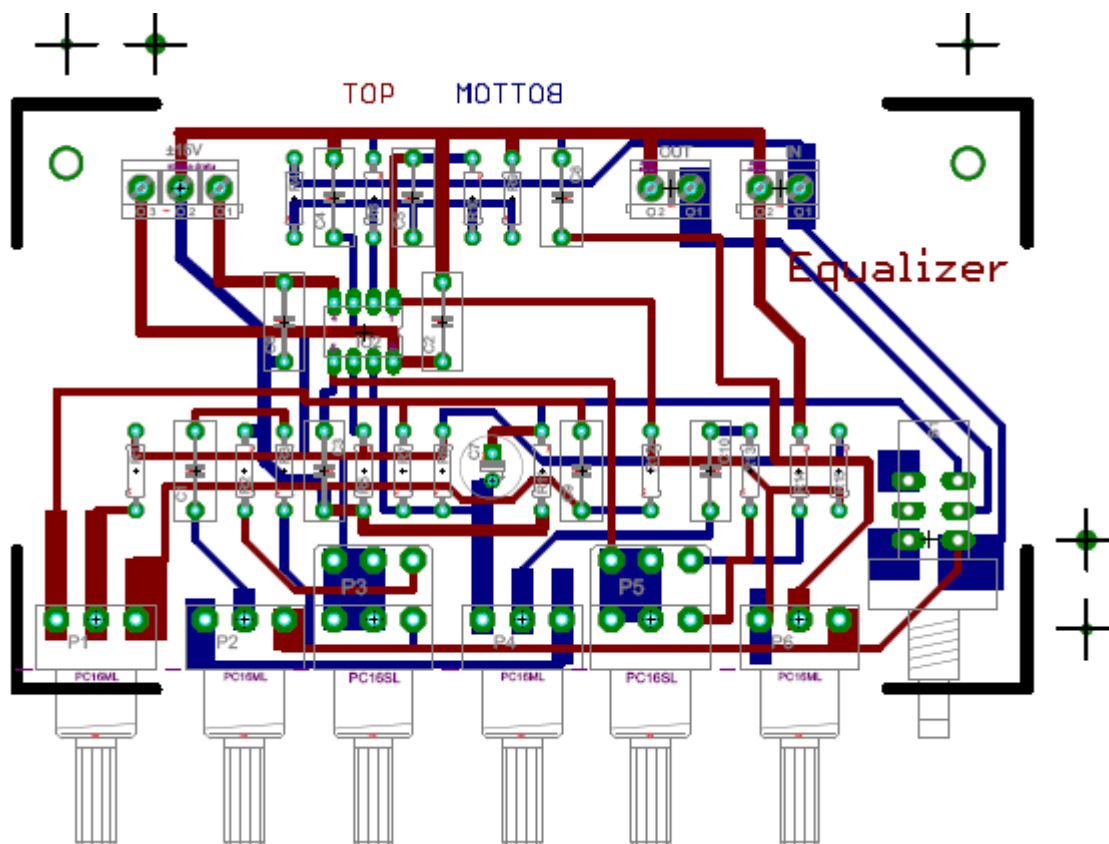
Hlavní částí tohoto korektoru je dvojitý operační zesilovač NJM4580. Mezi používanými operačními zesilovači pro tyto aplikace se řadí i známý NE5532, nebo kvalitnější a dražší LME49720. Každá jeho polovina zpracovává jedno přeladitelné pásmo středů a výšky a hloubky. Jinak řečeno, nižší středy se kombinují s korekcí výšek a vyšší středy s korekcí hloubek. Potenciometrem P6 nastavujeme výšky a P1 je pro hloubky. Potenciometrem P2 nastavujeme nižší středy a k němu dvojitý antilogaritmycký potenciometr P3 pro nastavení frekvencí (35 Hz – 1 kHz). Nakonec potenciometrem P4 nastavujeme vyšší středy a k němu dvojitý antilogaritmycký potenciometr P5 pro odpovídající nastavení frekvencí (500 Hz – 15 kHz). Jak lze vidět, parametrické středy se od 500 Hz do 1 kHz překrývají.

Celé zapojení lze přemostit přepínačem S1 (izostat). Napájecí napětí  $\pm 15$  V je filtrováno přes kondenzátory C6 a C2.

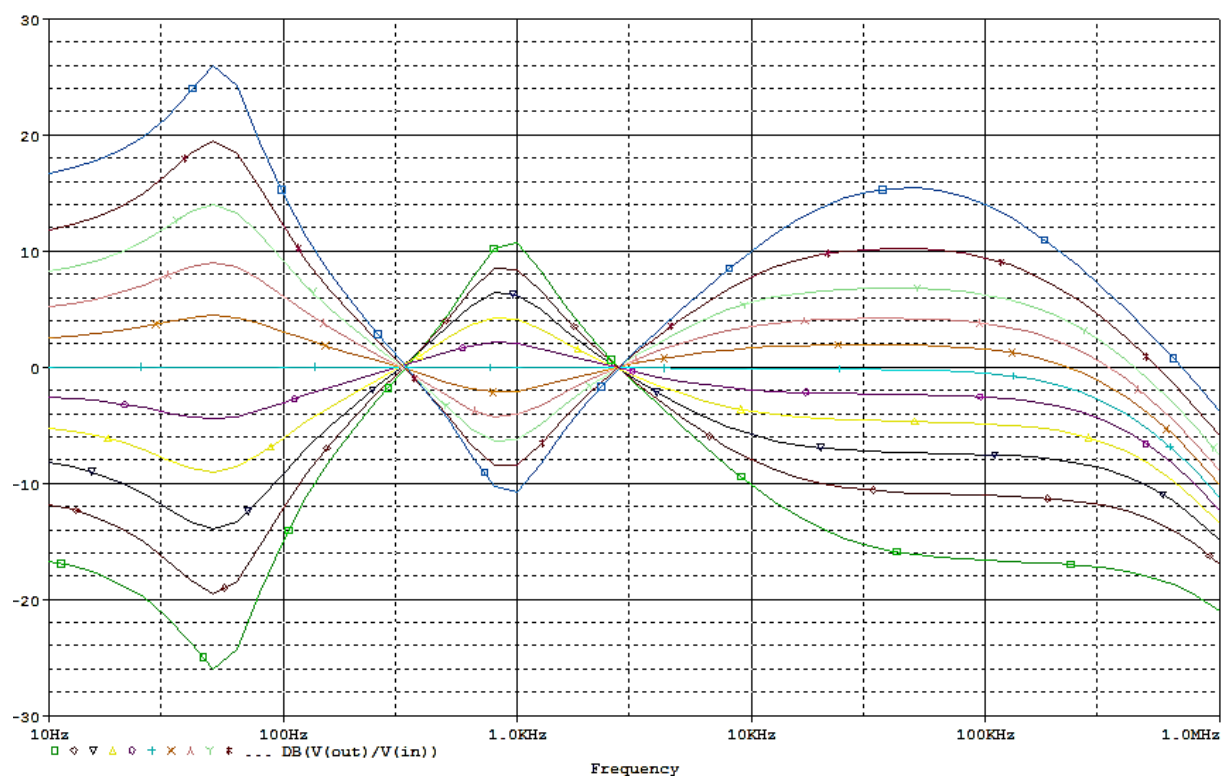
Napadá mě myšlenka, že pokud máme kvalitní parametrický korektor a zvukaře, který není moc zručný nebo začátečník, může celý reprodukováný zvuk pěkně zkazit. Naproti tomu šikovný zvukař dokáže i z jednoduššího korektoru „vytáhnout“ lepší zvuk. Zapojení je převzato z Amaterského rádia [11] a je navrženo v následujícím obrázku v programu Eagle.



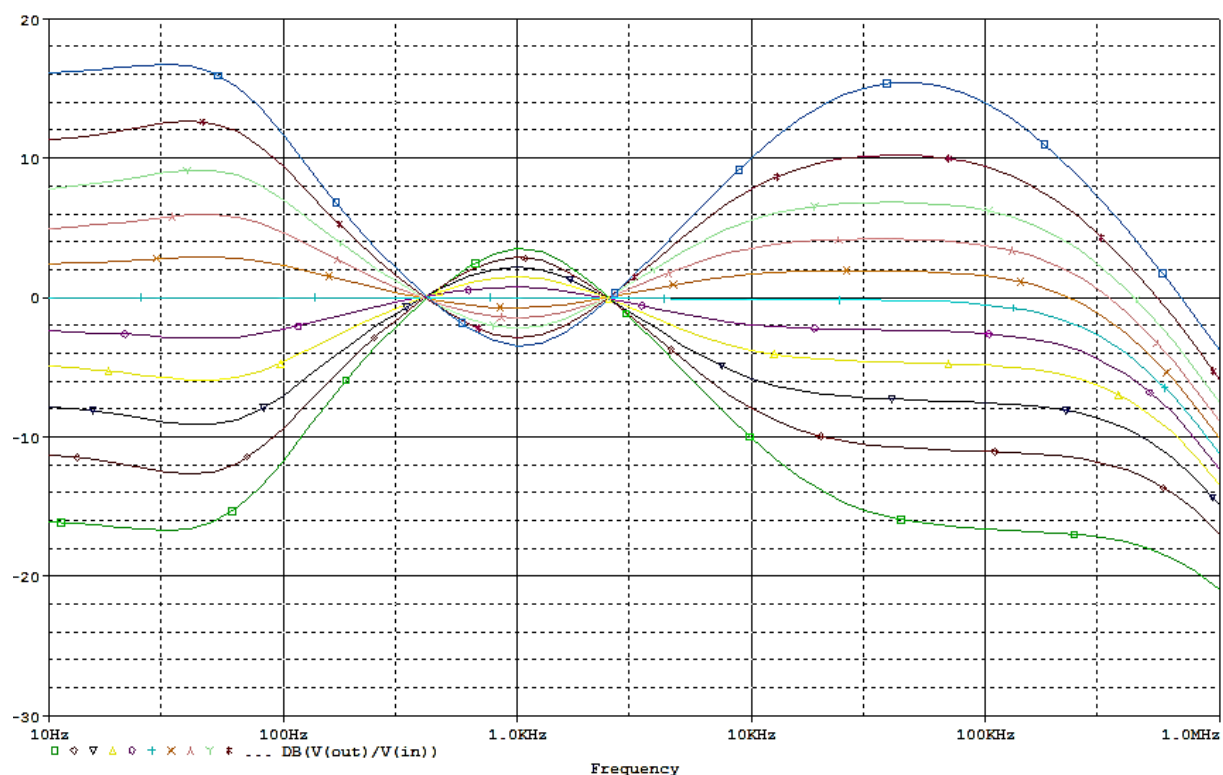
Obr. 20: Schéma čtyřpásmového semiparametrického korektoru



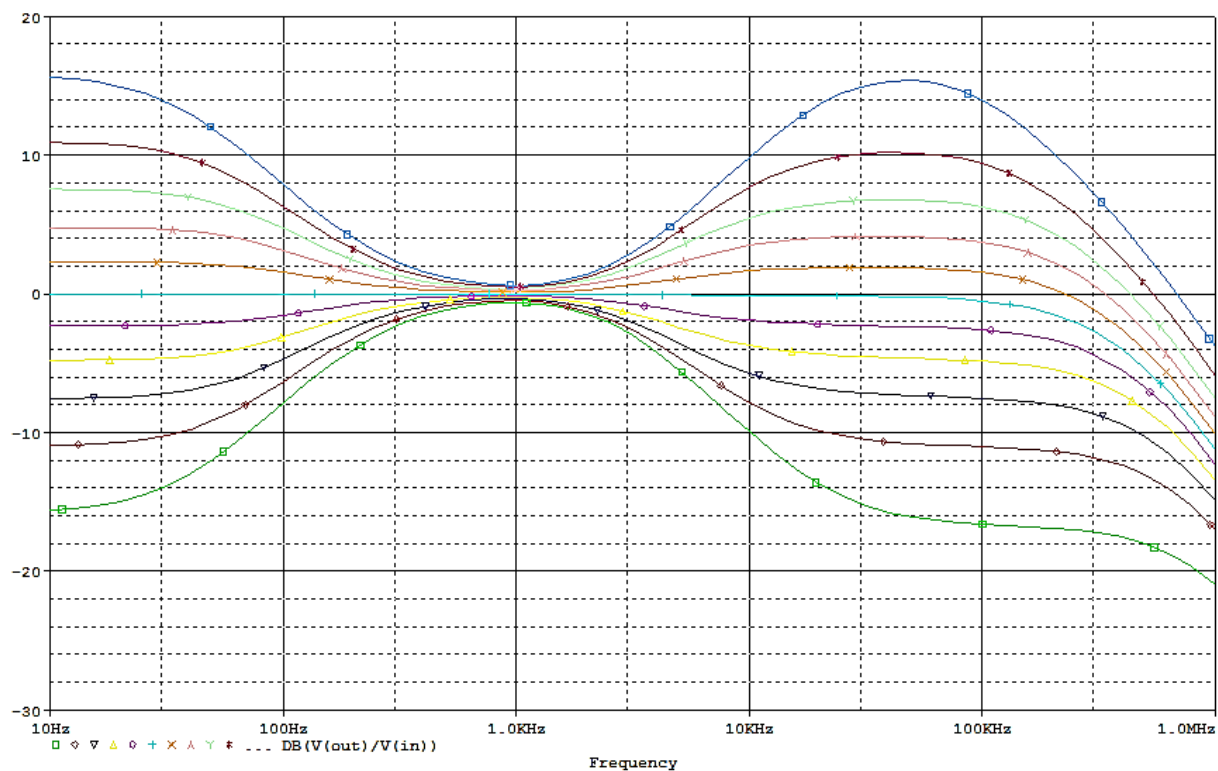
Obr. 21: Deska plošných spojů čtyřpásmového semiparametrického korektoru



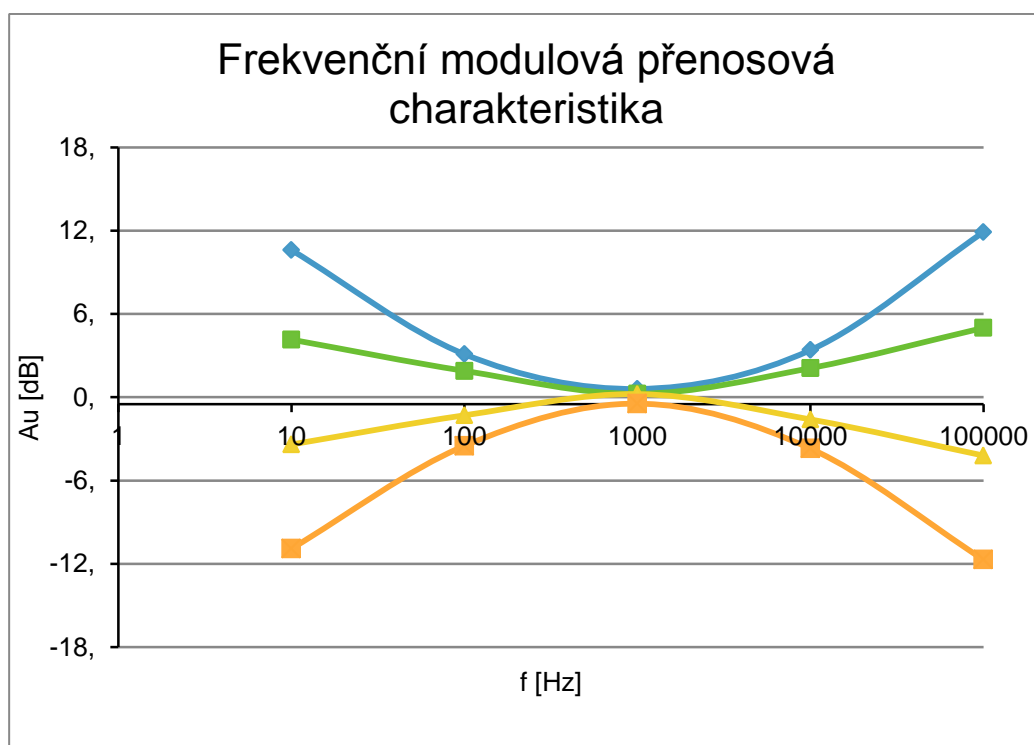
Obr. 22: Frekvenční přenosová modulová charakteristika korektoru, parametrické středy nastavené potenciometry P3 a P5 na hodnotu 0,5



Obr. 23: Frekvenční přenosová modulová charakteristika korektoru, parametrické středy nastavené potenciometry P3 a P5 na hodnotu 0,8



Obr. 24: Frekvenční přenosová modulová charakteristika korektoru, parametrické středy nastavené potenciometry P3 a P5 na hodnotu 1

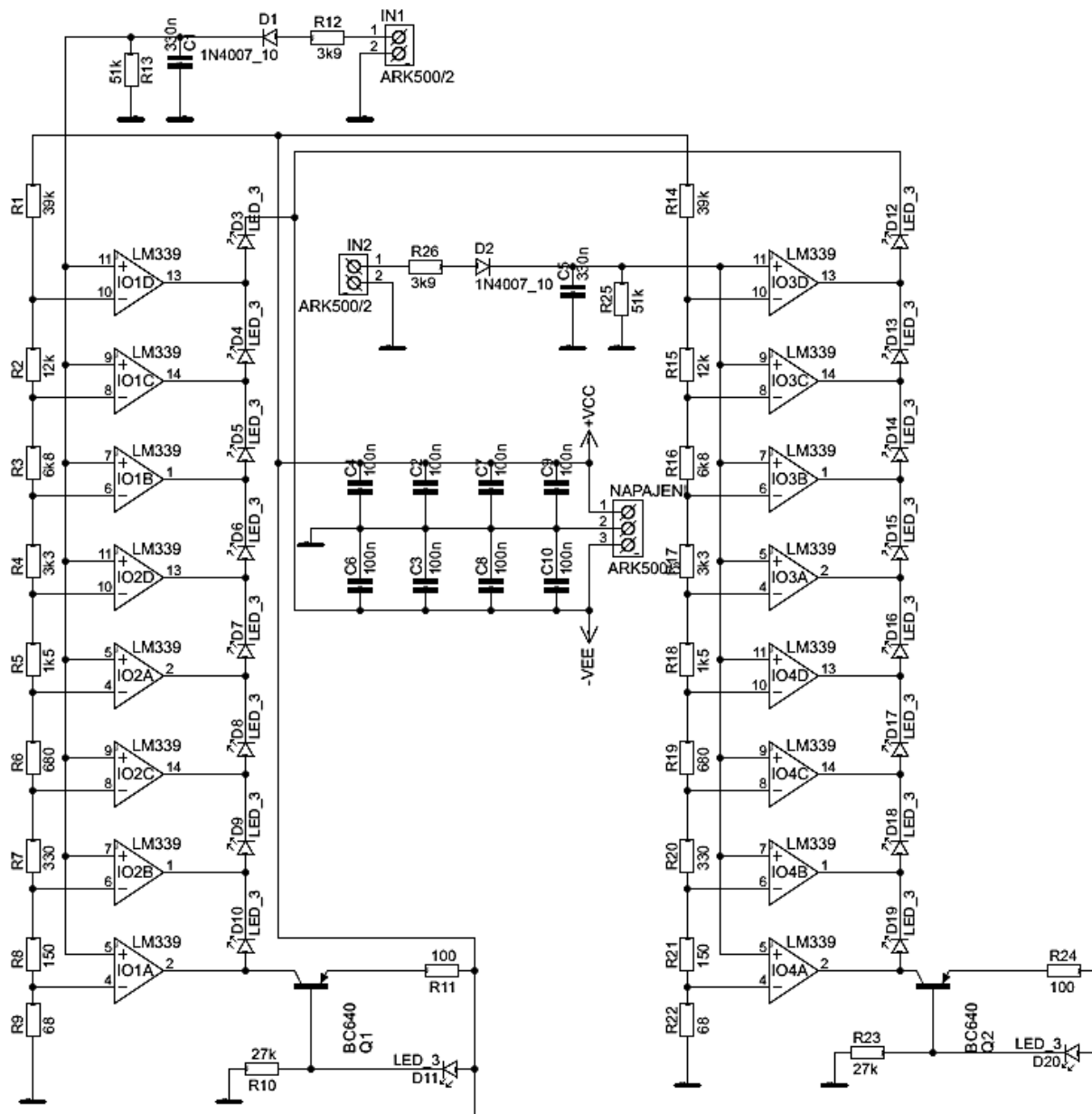


Obr. 25: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika

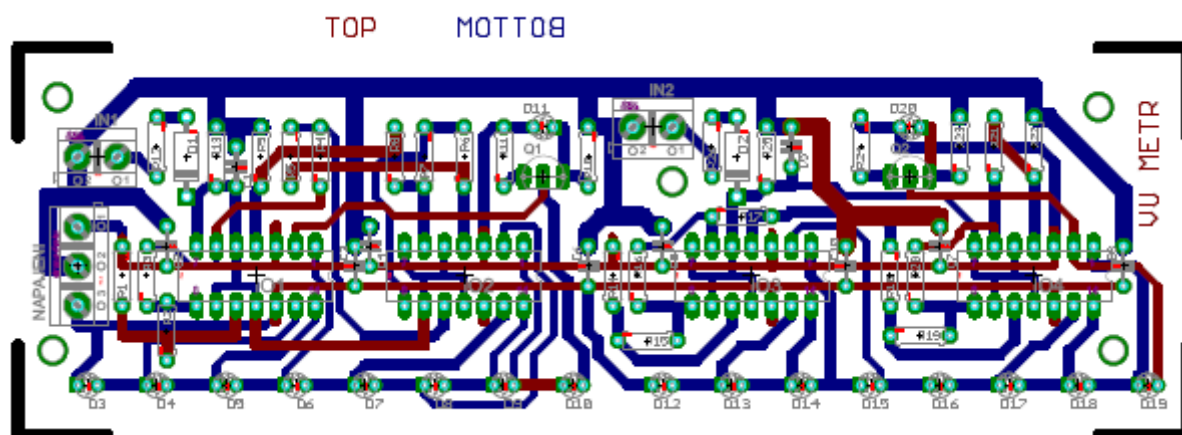
### 3.6 VU metr

Obvod je znázorněn na obr. 26 . Zapojení je navrhnuté pro oba kanály, pro jednodušší názornost si popíšeme pouze jeden kanál. Obvod je tedy založen na funkci odporového děliče odpory R1 až R9. Odbočky děliče jsou přivedeny na komparátory LM339. Tranzistor T1 vytváří zdroj konstantního proudu, daného předpetím báze na LED D11 a emitorovým odporem R11 . LED diody se postupně rozsvěcují v prvním kanále od D10 - D3 a ve druhém kanále od D19 - D12. Výhodou tohoto zapojení je konstantní odběr proudu a nízká spotřeba, protože všechny LED diody jsou řazeny sériově. Jak již bylo zmíněno v popisu blokového schématu, je potřeba co nejjemnější kroky okolo hodnoty 0 dB (0,775 V). Je potřeba dostatečný dynamický rozsah (v našem případě +10/-20 dB) a zároveň jemné rozlišení okolo 0 dB, je potřeba použít zapojení s různým krokem pro různé úrovně signálu. [24]

Napájecí napětí je filtrováno kondenzátory C2 až C4 a C6 až C10.



Obr. 26: Schéma VU metru



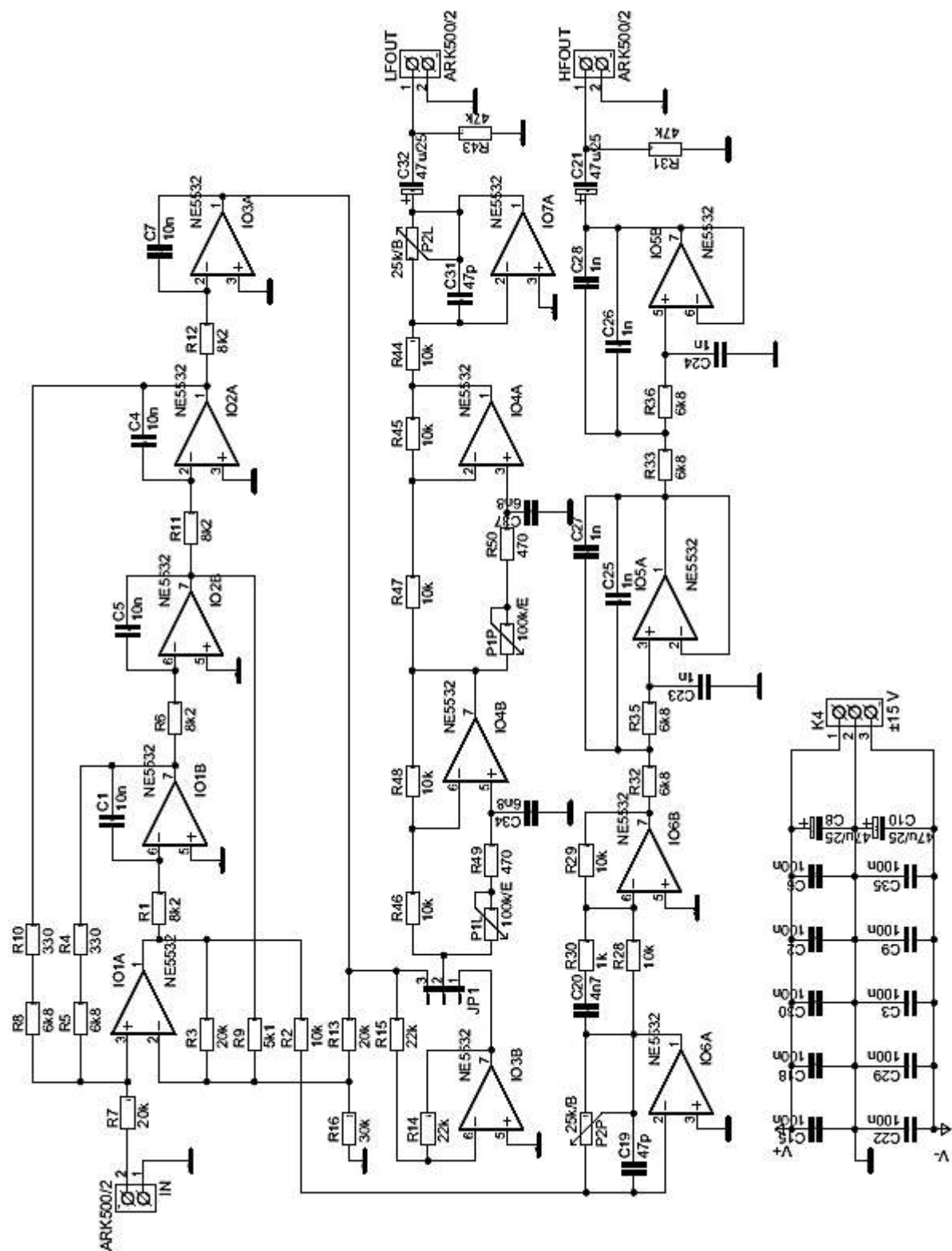
Obr. 27: Deska plošných spojů VU metru

### 3.7 Crossover (aktivní výhybka)

Crossover je 4. řádu typu Linkwitz-Riley se strmostí 24 dB/okt. Je to hojně používaný typ crossoveru v nf technice, protože má vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku přes celé pásmo a fázovou shodu dolního i horního pásma. Na výstupu prvního operačního zesilovače IC1A jsou výšky, na výstupu IC3A jsou hloubky předcházející integrátory. Propojka JP1 nám určuje vzájemnou fázi dolního a horního pásma, IC3B je zapojen jako invertor. Časový posuv mezi signálem basového reproduktoru a signálem výškového reproduktoru je ošetřen potenciometrem P3, kterým kompenzujeme časové zpoždění výškového systému a také plynule nastavitelný zpožďovací členek, který je tvořen dvojitým operačním zesilovačem IC10. Srovnání citlivosti basového a výškového reproduktoru umožňuje zesilovač IC9A s polovinou potenciometru P2A. Potenciometr P2B slouží pro regulaci zisku výškové sekce, za ním následuje obvod pro kompenzaci poklesu zesílení CD horn, který vykazuje pokles zisku v jednotkách kHz, kompenzovaný RC členem C20/R30. Výstup výškové sekce je ještě opatřen dolní propustí 4. řádu se strmostí 24 dB/okt., která omezuje kmitočty nad 16 kHz.

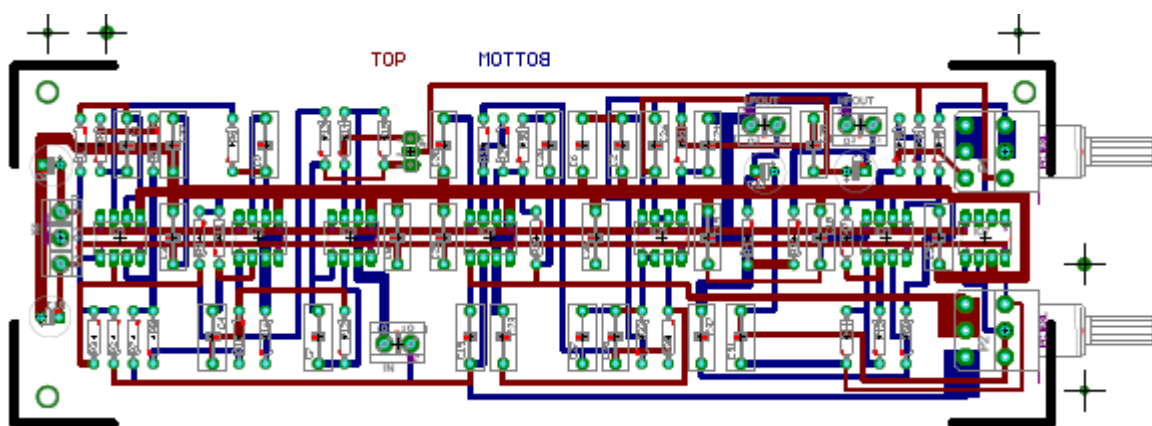
V uvedeném zapojení tedy můžeme měnit dělicí kmitočet crossoveru, kmitočty dolní a horní propusti a kompenzaci pro CD horny. Výstupní výkon je omezen jen v basové sekci maximálním napájecím napětím. (AR 9/2009)

Napájecí napětí  $\pm 15$  V je filtrováno přes kondenzátory C2, C3, C6, C9, C18, C29, C30, C33, C35 a C36. Zapojení jsem převzal z Amaterského Rádía [10] a je nakresleno programem Eagle na následujícím obrázku.

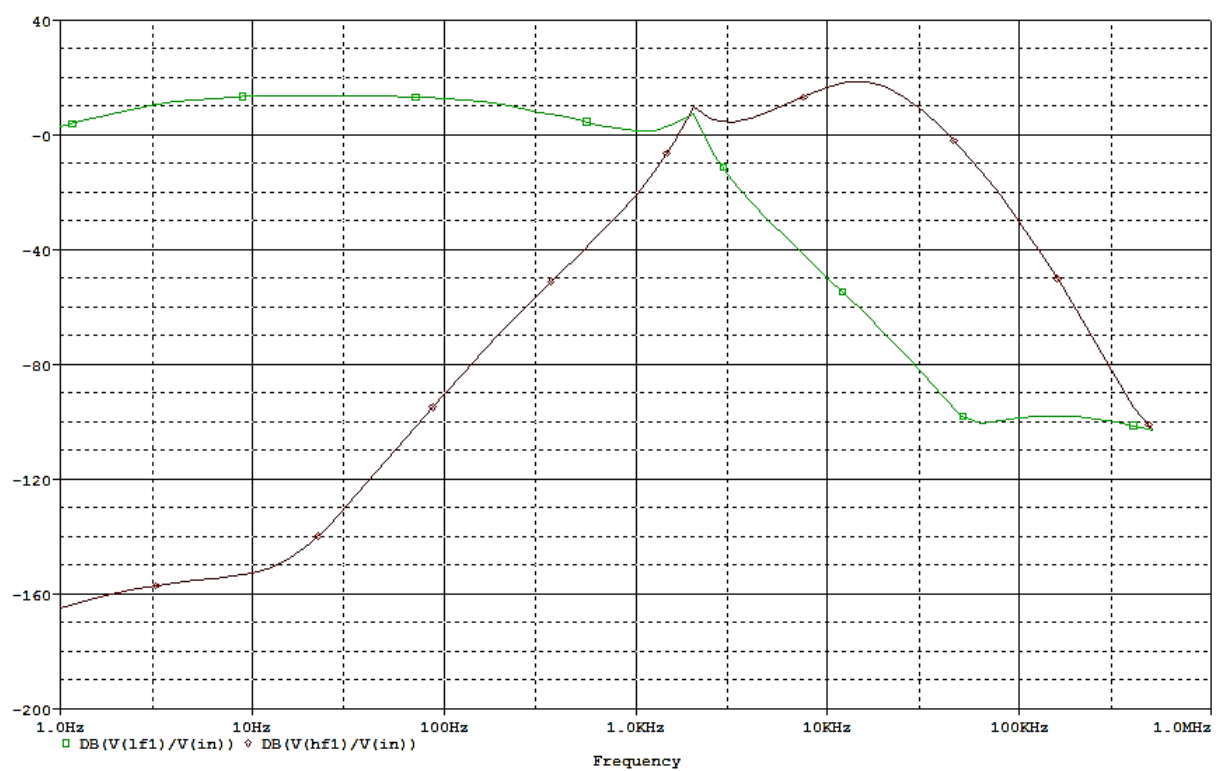


Obr. 28: Schéma crossoveru

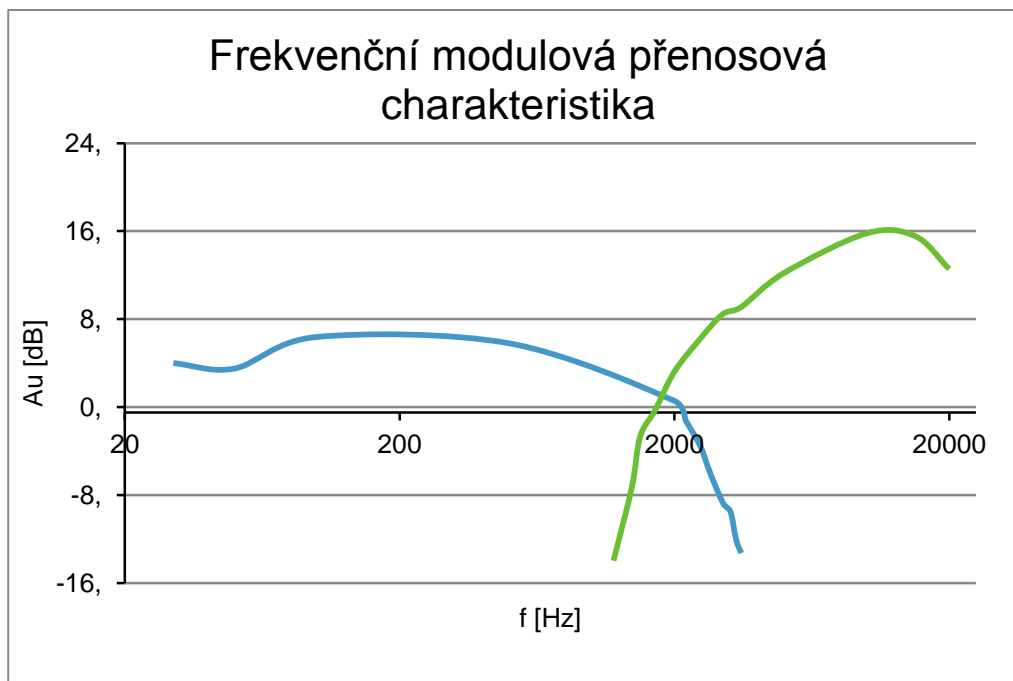




Obr. 29: Deska plošných spojů crossoveru



Obr. 30: Frekvenční přenosová modulová charakteristika

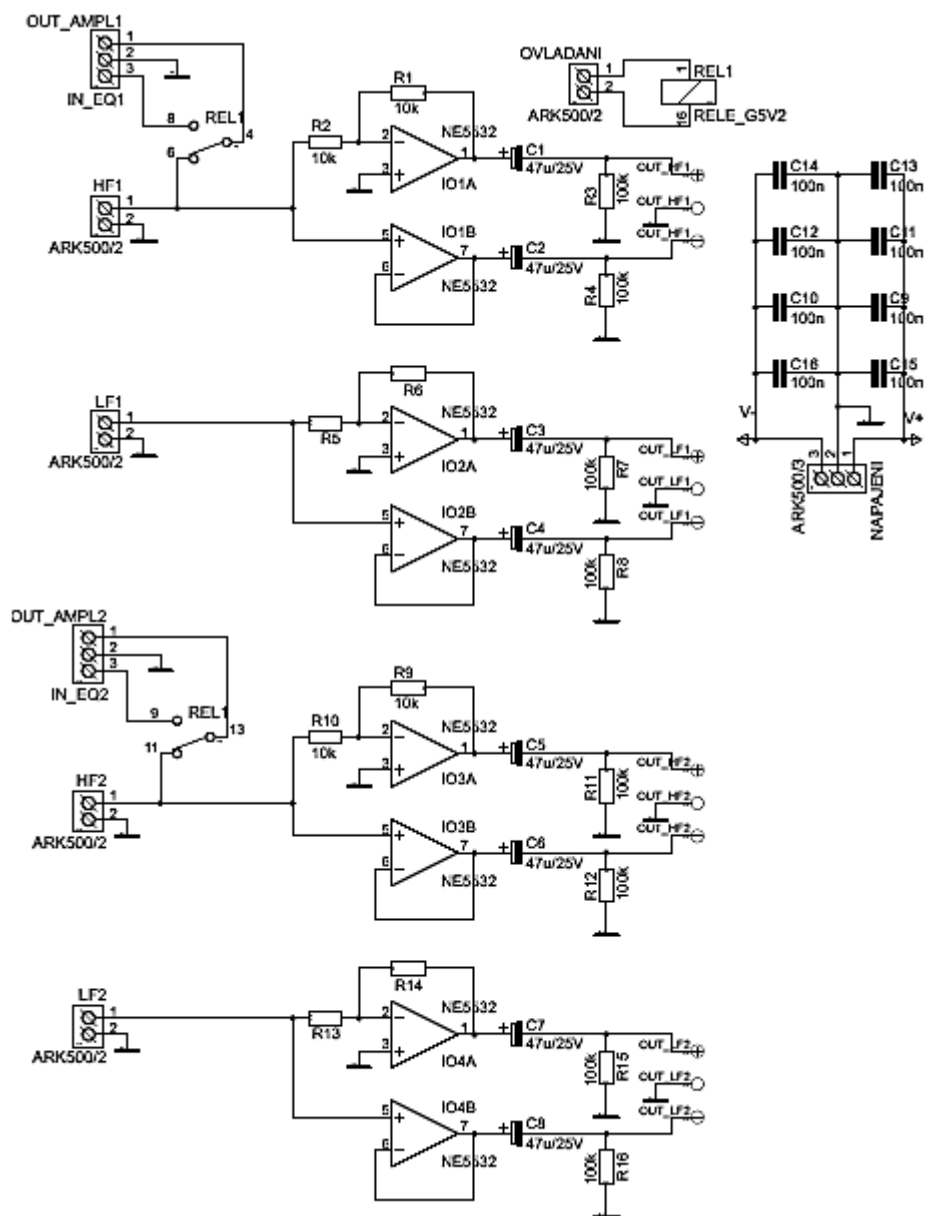


Obr. 31: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika crossoveru

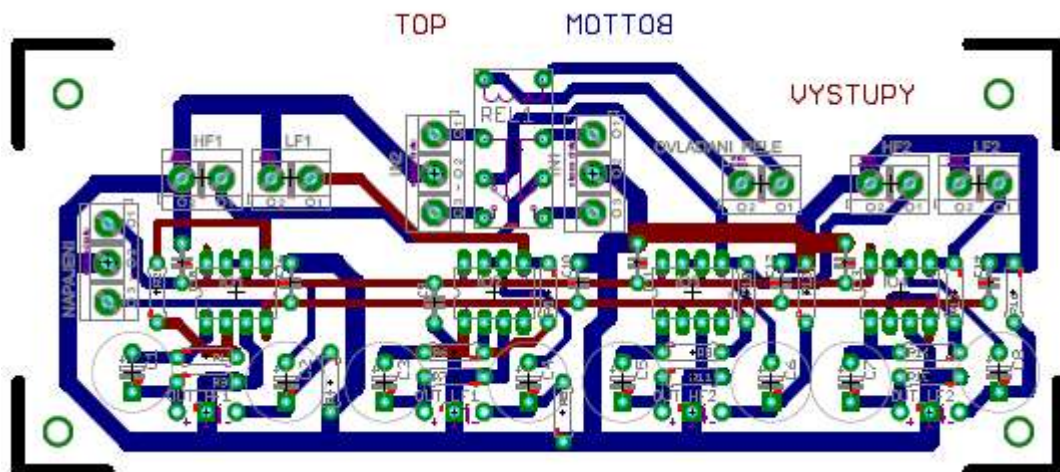
### 3.8 Obvody výstupů, relé

Pro symetrické výstupy potřebujeme obvody k rozdělení fáze, zapojení je znázorněno na obr. 32. Tyto obvody vytvářejí jeden signál normální, druhý otočený o  $180^\circ$ . Hlavní funkci plní dvojité operační zesilovače IO1 – IO4, jsou zde opět použity univerzální operační zesilovače NE5532. Jedna část operačního zesilovače plní funkci sledovače signálu, druhá část invertoru. Výstupy zesilovačů jsou odděleny kondenzátory. Výstupy jsou opatřeny  $100\text{ k}\Omega$  odporem. [25] [27]

Napájecí napětí  $\pm 15\text{ V}$  je filtrováno kondenzátory C9 až C16.



Obr. 32: Schéma obvodů výstupů



Obr. 33: Deska plošných spojů obvodů výstupů

### 3.9 Výstupní výkonový zesilovač

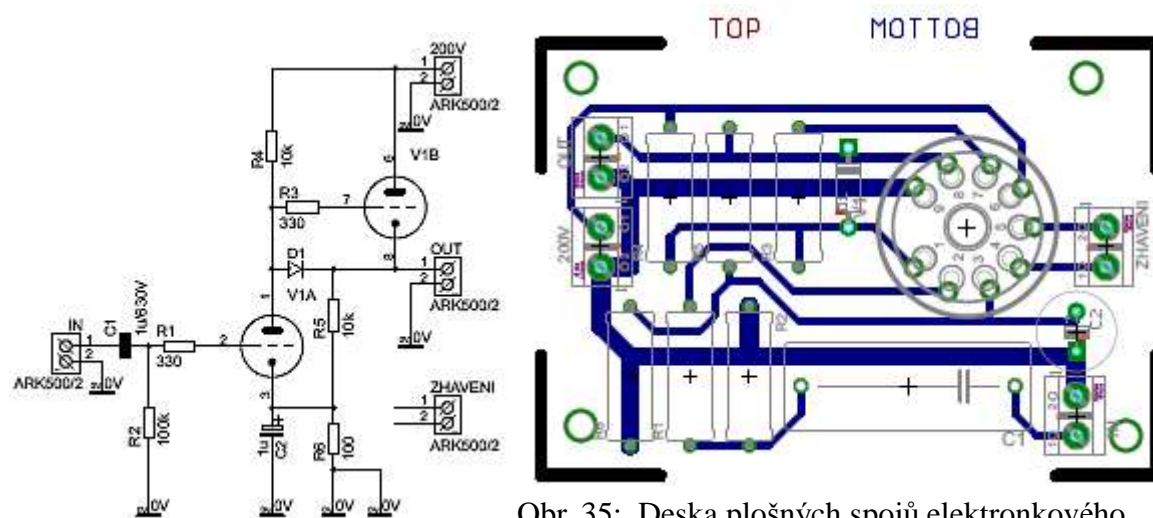
Schéma zapojení výstupního výkonového zesilovače je na obr. 37. Zapojení je ve stylu „hybridní“ zesilovač. Jako hybridní zesilovač se může nazvat kombinace elektronek a FET tranzistorů.

MOSFET tranzistory osazené v koncových zesilovačích mají podle [28] svůj specifický zvukový projev. Výrobci těchto výkonových tranzistorů jsou např. firmy IRF, Toshiba, Renesas (dříve Hitachi) a drobný výrobce Exicon.

Výstupní zesilovač má napěťový přenos roven jedné, nezesiluje, v podstatě převádí vstupní signál na výkon do reproduktorů. Zapojení MOSFET tranzistorů se může nazvat v případě bipolárních tranzistorů jako emitorový sledovač. Zesílení se provádí pomocí elektronkového předzesilovače, pohybuje se okolo 20 dB. Zesilovacím prvkem elektronkového předzesilovače je dvojitá elektronka ECC88. První stupeň je zesilovací, druhý stupeň je v činnosti katodového sledovače. V podstatě se jedná o přímo vázané stupně se zápornou zpětnou vazbou. Dioda D1 vytváří na mřížce druhého stupně V1B záporné napětí vůči katodě. Koncový výkonový stupeň je zapojen zrcadlově. V cestě signálu jsou v podstatě jen výkonové MOSFET tranzistory. Kladná půlva budi horní dvojici MOSFET tranzistorů, záporná spodní dvojici tranzistorů. Tranzistory T1 a T2 jsou zdroje proudu pro 12V zenerových diod D8, D9 a z nich se snímá napětí pro řízení koncových MOSFET tranzistorů. Tranzistorem T3 s pomocí trimru R2 se nastavuje klidový proud 100 mA, aby se zamezilo přechodovému zkreslení. Trimrem R1 se nastavuje nulové výstupní stejnosměrné napětí. Zenerovy diody u MOSFET tranzistorů zapojené mezi G a S výstupy slouží jako ochrana proti napěťovým špičkám. Ke kompenzaci zátěže je určena cívka L1 na výstupu zapojená paralelně s odporem R27 (reproduktory vykazují komplexní zátěž), poté následuje RC člen R28 a C6, který také zajišťuje stabilitu zesilovače. Napájení zapojení je  $\pm 50$  V filtrované kondenzátory C8, C9, C12, C13, C16 a C17. [28]

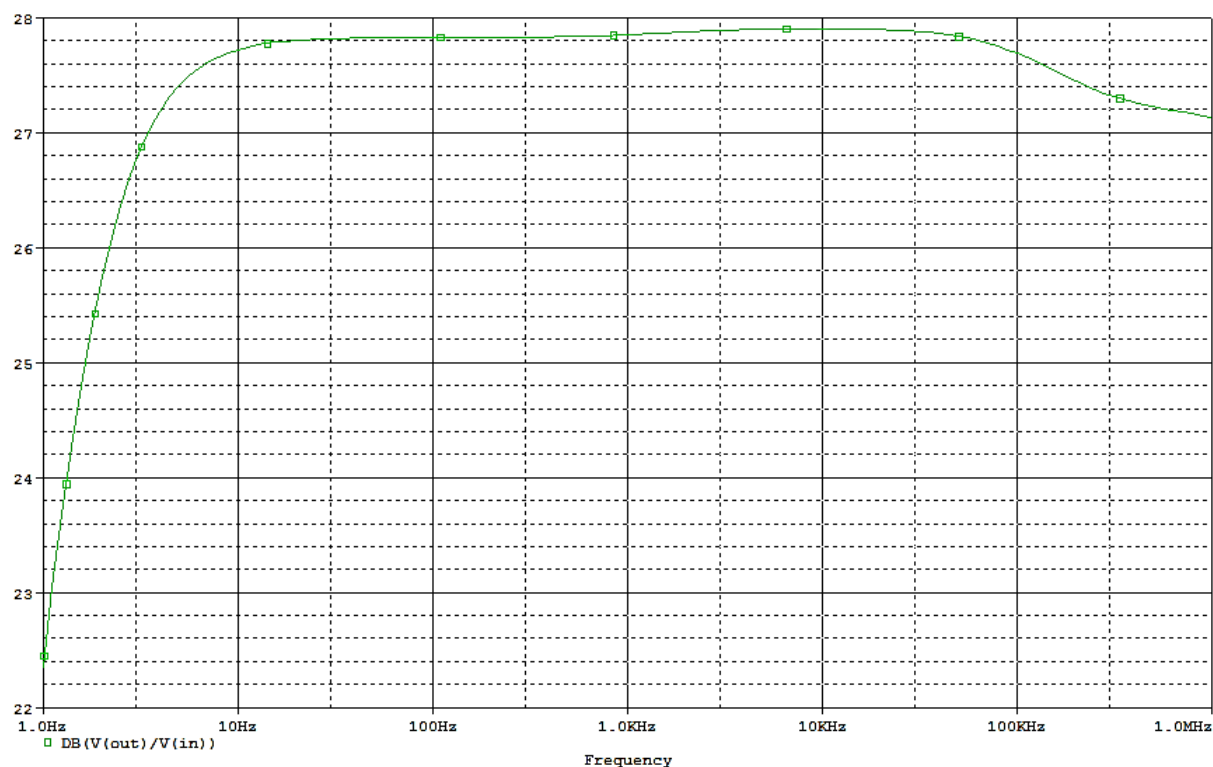
Součástí zesilovače je ochranný obvod reproduktorů. Připojí k výstupu zesilovače po malé chvíli reproduktory (cca 4s), aby se na ně nedostaly nechtěné napěťové špičky.

Bipolární kondenzátor C14 svádí na zem střídavý signál. Jakmile se objeví na vstupu stejnosměrné napětí, prochází přes usměrňovací můstek, pomocí tranzistorů se dostane na spínací relé 6 V a odpojí reproduktory. Simulace byla provedena jen samotným obvodem ochrany, ověřila se jen funkce sepnutí při určité hodnotě. [28]

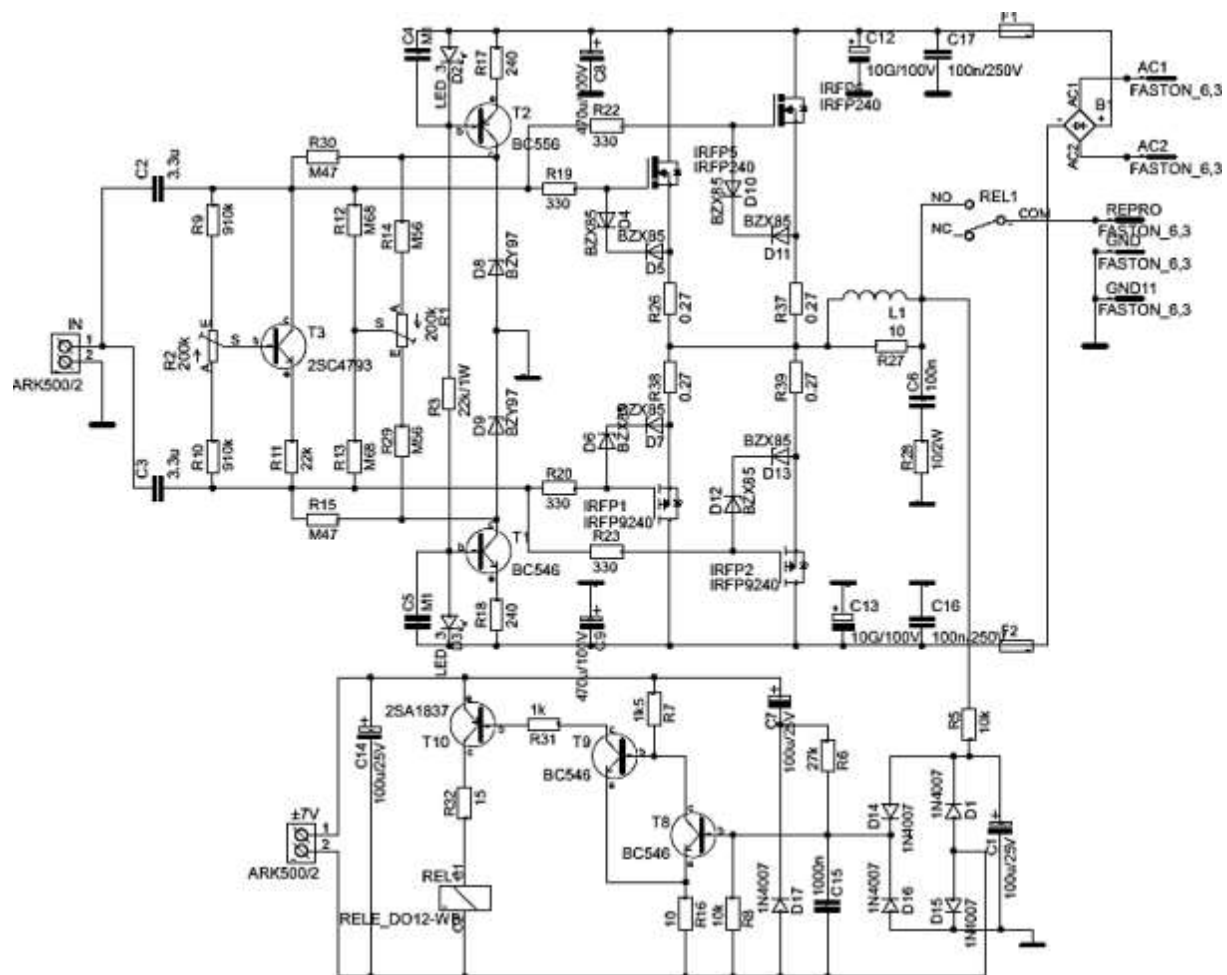


Obr. 35: Deska plošných spojů elektronického předzesilovače

Obr. 34: Schéma elektronického předzesilovače



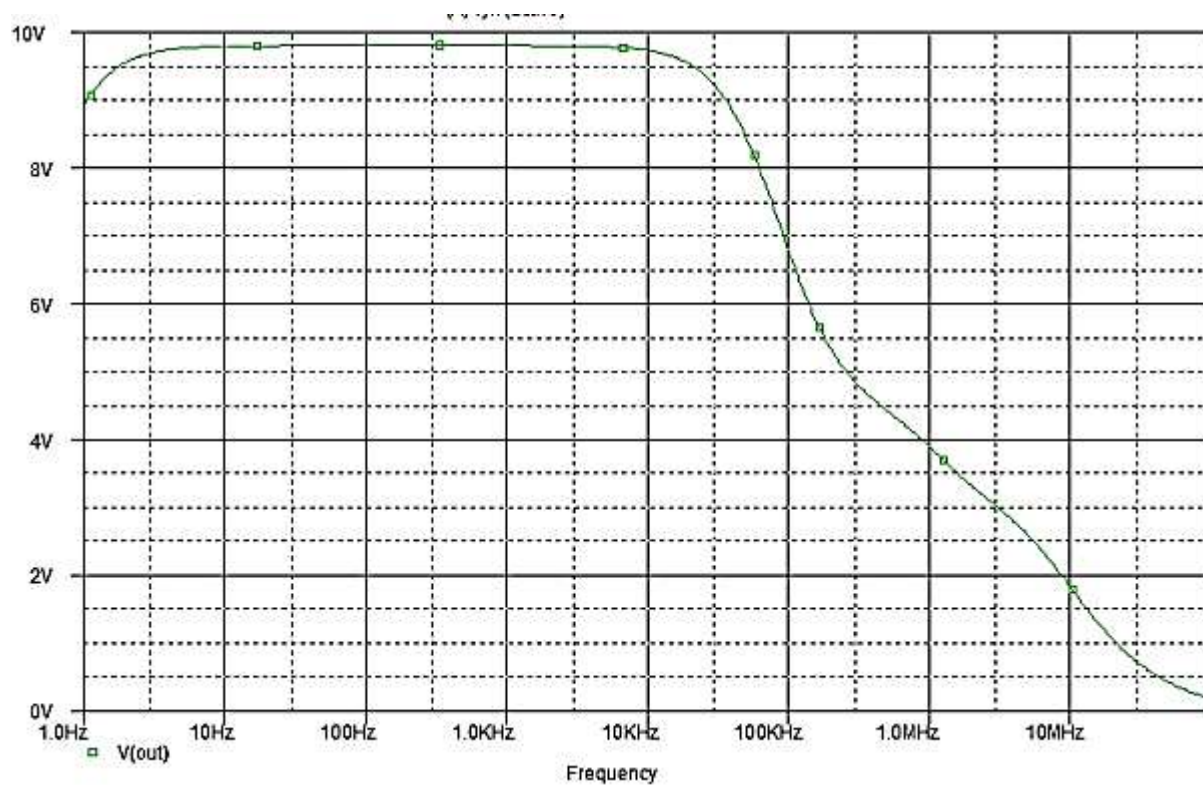
Obr. 36: Frekvenční přenosová modulová charakteristika elektronického předzesilovače



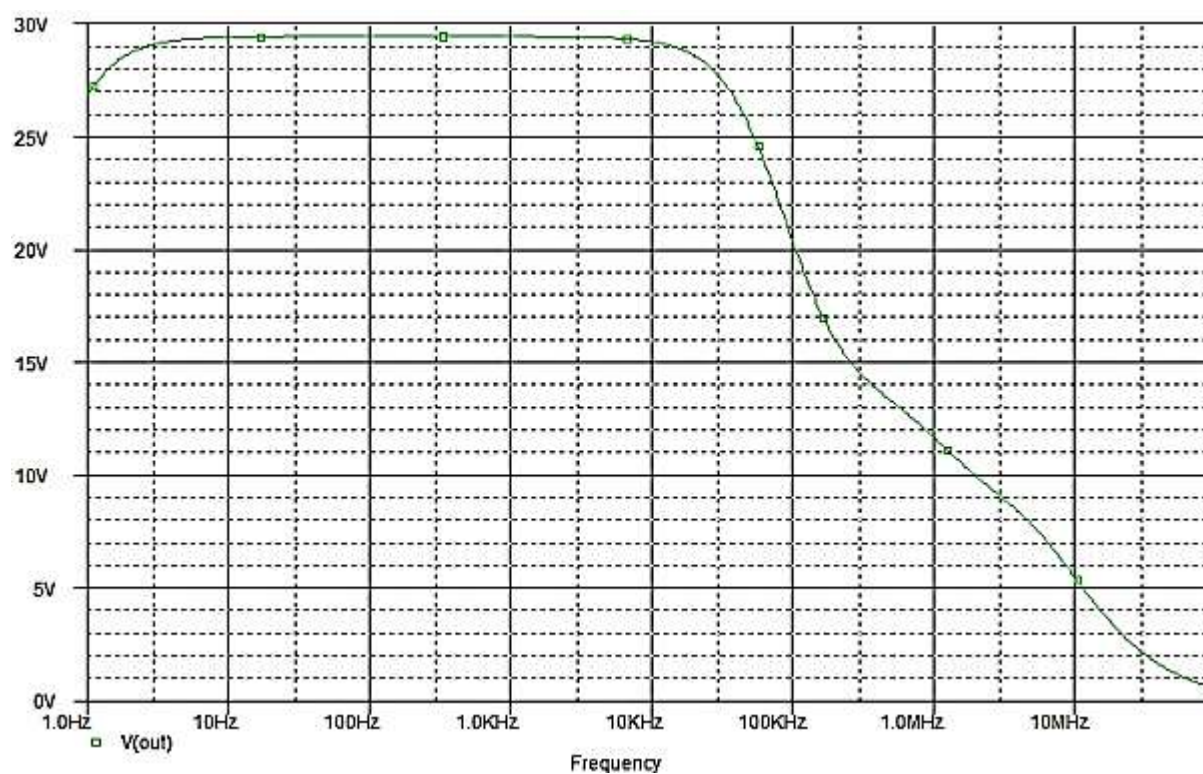
Obr. 37: Schéma výstupního zesilovače s ochranným obvodem





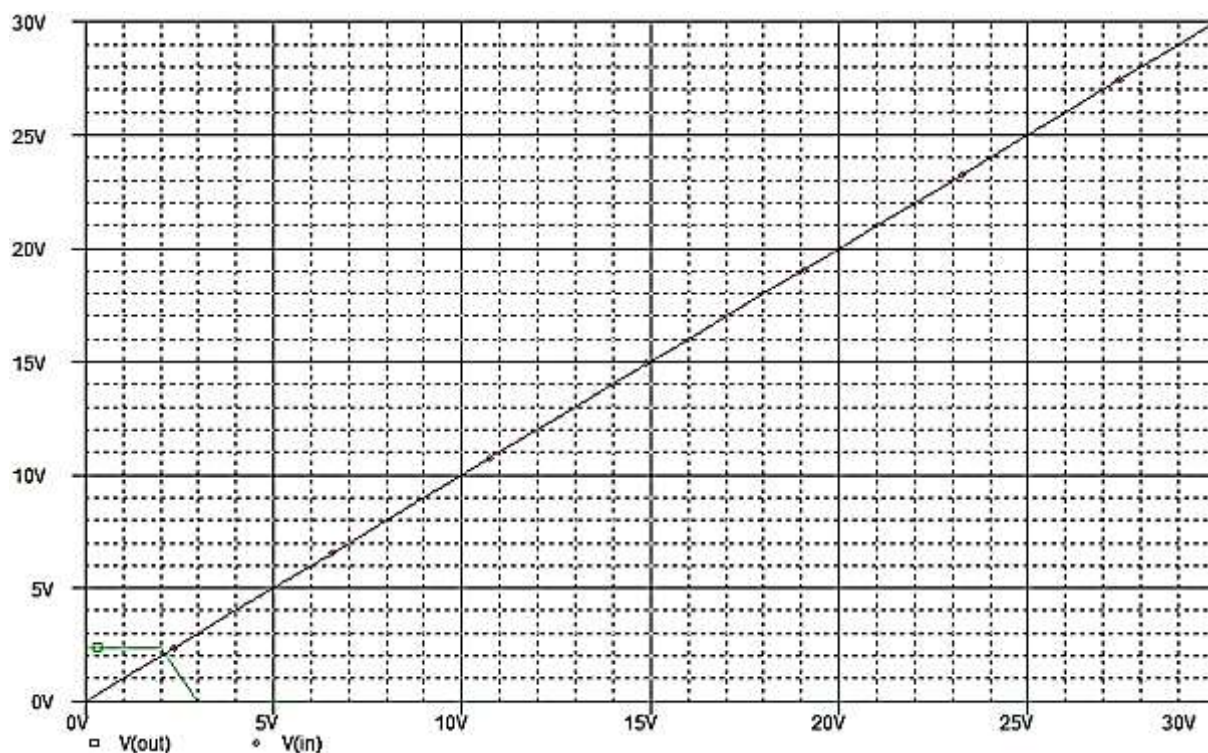


Obr. 40: Výstupní amplituda při vstupní amplitudě 10 V



Obr. 41: Výstupní amplituda při vstupní amplitudě 30 V





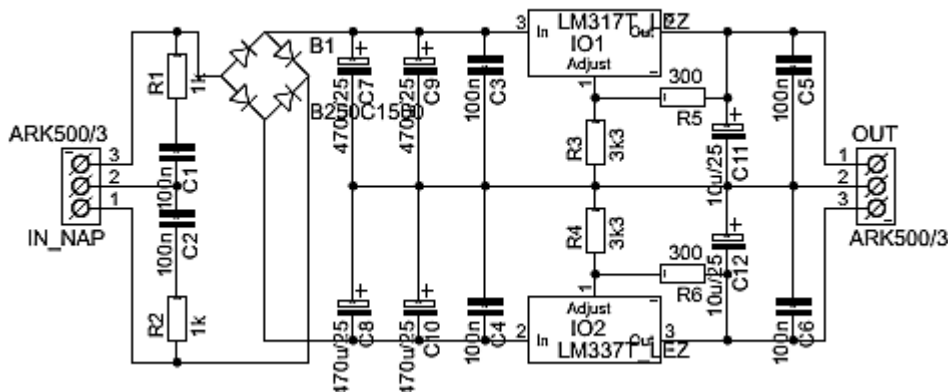
Obr. 42: Ověření spínání ochranného obvodu při určité hodnotě



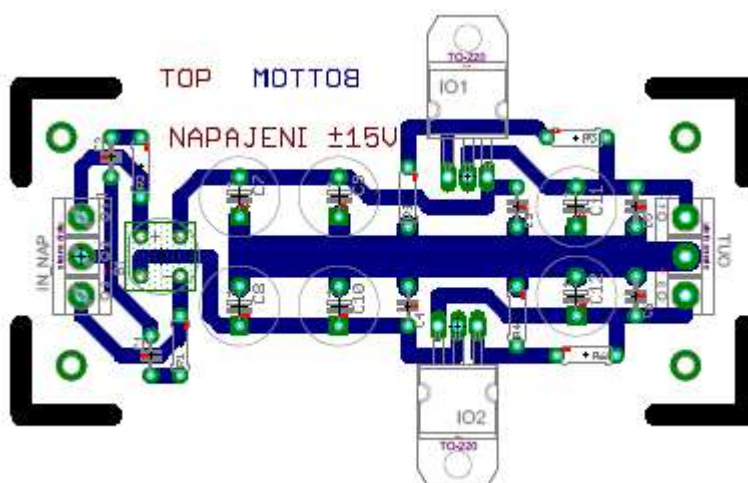
Obr. 43: Naměřená frekvenční přenosová modulová charakteristika výstupního zesilovače

### 3.10 Napájecí zdroj $\pm 15$ V

Napájecí zdroj je zapojen podle obr. 44. Zdroj je napájen toroidním síťovým trafem připojeným ke vstupním konektorům IN\_NAP. Po usměrnění napětí diodovým můstkem B1 je napětí filtrované čtveřicí kondenzátory C7, C8, C9 a C10 a stabilizováno regulátory IO1 a IO2 na  $\pm 15$  V. Použité stabilizátory jsou klasické LM317. Obě polarities jsou přivedeny na všechny desky, které jej vyžadují. [23]



Obr. 44: Schéma napájecího zdroje  $\pm 15$  V

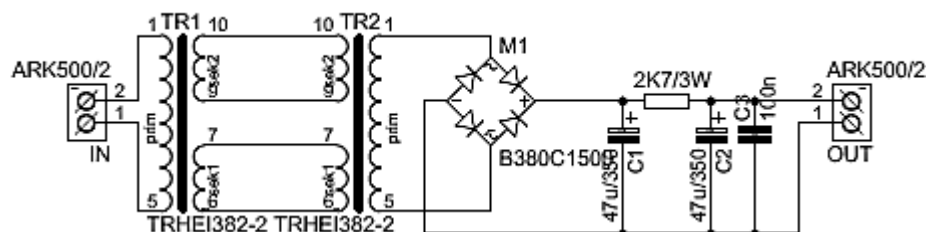


Obr. 45: Deska plošných spojů napájecího zdroje  $\pm 15$  V

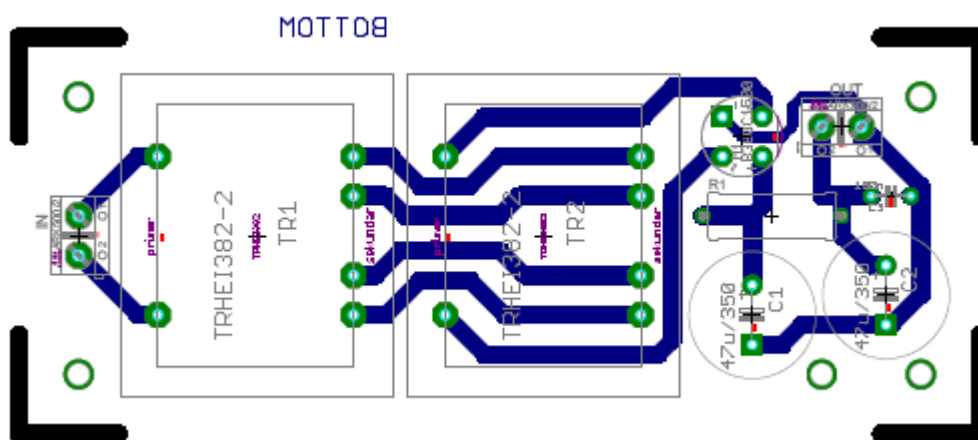
### 3.11 Anodový zdroj

Anodový zdroj je uveden na obr. 46. Transformátor TR1 je připojen na síťové napětí 230 V, transformuje vstupní střídavé napětí na  $2 \times 18$  V, druhý transformátor TR2 provádí inverzní operaci. Na výstupu by mělo být opět napětí stejné jak na vstupu, je ale kvůli ztrátám přibližně o 20 % menší. Kondenzátor C1 se nabije na špičkovou hodnotu 280 V, kterou

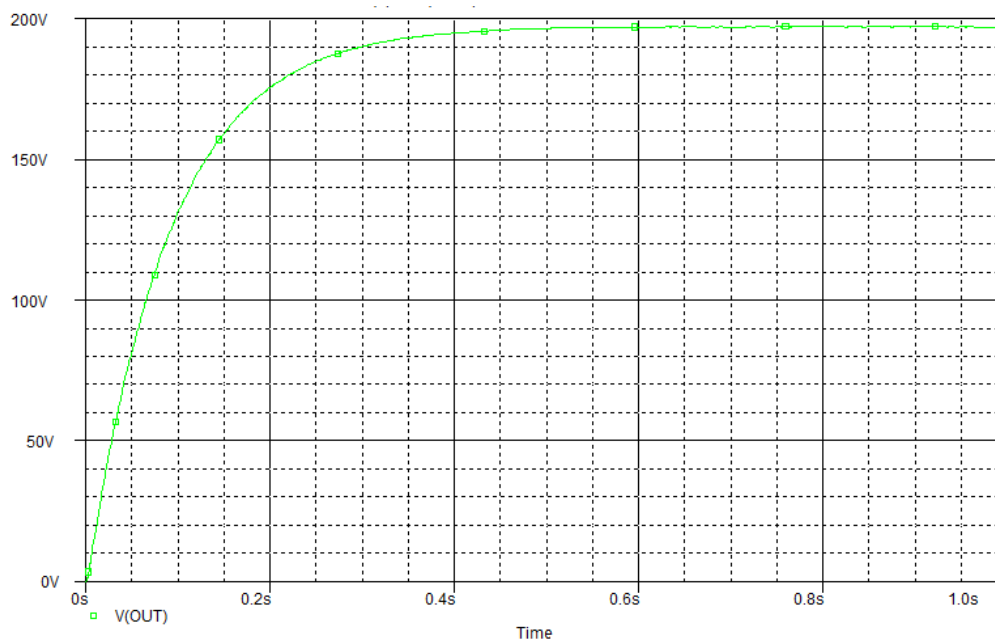
omezujeme rezistorem R1 (potřebujeme omezit 50 V). Při odběru proudu 20 mA je vypočtený odpor 2500  $\Omega$ , výkon na rezistoru  $P=U \cdot I = 50 \cdot 0,02 = 1$  W. Je vhodné nechat rezervu, proto je rezistor 3 watový. Výstupní napětí by se mělo pohybovat okolo  $\pm 200$  V. [29]



Obr. 46: Schéma anodového zdroje



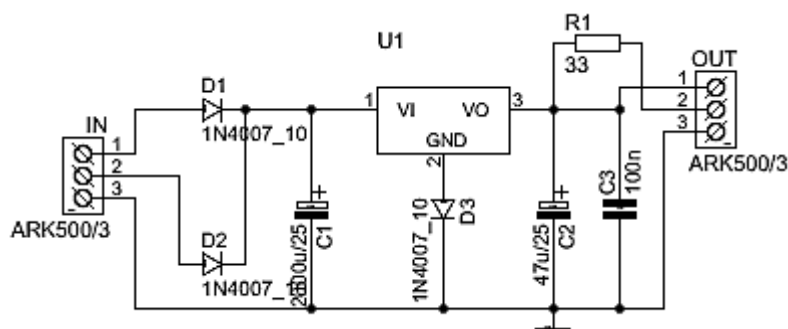
Obr. 47: Deska plošných spojů anodového zdroje



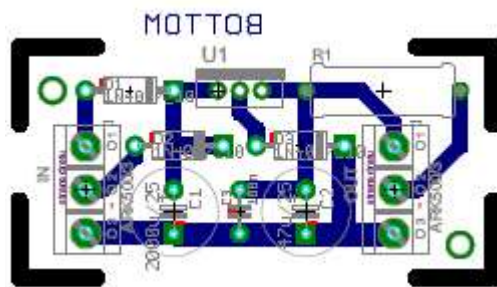
Obr. 48: Simulace výstupního napětí

### 3.12 Zdroj napětí pro žhavení elektronek a ochranný obvod výstupního zesilovače

Uvedený zdroj napětí napájí ochranný obvod výstupního výkonového zesilovače a také slouží jako zdroj žhavení pro elektrony. Diody D1 a D2 usměrňují střídavé napětí ze dvou vinutí transformátoru. Kondenzátory C1 až C3 jsou filtrační. Zenerova dioda D3 zvyšuje výstupní napětí přibližně o 0,7 V pro napájení ochranného obvodu. Výstupní napětí pro elektrony je 7 V a pro elektrony je zmenšeno rezistorem R1 na hodnotu 6,3 V. [30]



Obr. 49: Schéma zdroje napětí pro žhavení elektronek a ochranný obvod výstupního zesilovače



Obr. 50: Deska plošných spojů zdroje napětí pro žhavení elektronek a ochranný obvod výstupního zesilovače

### 3.13 Toroidní síťový transformátor

Toroidní transformátor má výkon 400 W, výstupy 2x41 V pro napájení výstupního výkonového zesilovače, 2x16,5 pro napájení napájecí zdroj  $\pm 15$  V a 2x7 V pro napájení Zdroje napětí pro žhavení elektronek a ochranný obvod výstupního zesilovače. Rozměry trafo 130/65 mm. Bylo zakoupeno na objednávku podle vhodných výstupních napětí ve specializované elektronické firmě.

## 4. KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

Všechny desky plošných spojů byly vyrobeny ve školní dílně, byly osazeny autorem této práce ve školní “bastlárně” a také v domácí dílně. Celá tato práce je financována autorem (kromě samotných neosazených desek plošných spojů), cena se vyšplhala na docela velkou hodnotu, autor si plánuje postupem času dodělat vše na této práci a také využít aparaturu k ozvučování menších sálů, představení, atd.

Konstrukční část této práce je velmi náročná. Uspořádat devatenáct desek a poměrně velké, těžké toroidní trafo vyžaduje značnou konstrukční představivost.

Nejprve je třeba začít s největšími deskami - koncovými zesilovači. Jsou přichycené na postraních chladičích ozvučovací skříni na distančních podložkách. Přichycení desky není jednoduché - prvním krokem je vyměření a uchycení MOSFET tranzistorů a tranzistoru pro nastavení klidového proudu na samotný chladič, poté vyměřit připevnění desky (aby přesně seděly nožičky tranzistorů), desku přišroubovat a nakonec připájet vývody tranzistorů. Na chladičích jsou také připevněny elektronkové předzesilovače.

Toroidní transformátor váží přes 4 kg, musí být pevně a silně přichycen pomocí plechu ve tvaru U a dalšími součástmi.

Na zadním panelu je umístěn samostatně síťový konektor s vypínačem a pojistkou, dva pozlacené šroubovací konektory pro repro výstup a dva symetrické výstupní konektory. Další konektory, přepínače a potenciometry jsou součástí desek plošných spojů, tedy 2x deska crossoveru, 2x deska symetrického vstupu předzesilovače (uchyceny svisle) a deska stereofonního předzesilovače (také uchycena svisle).

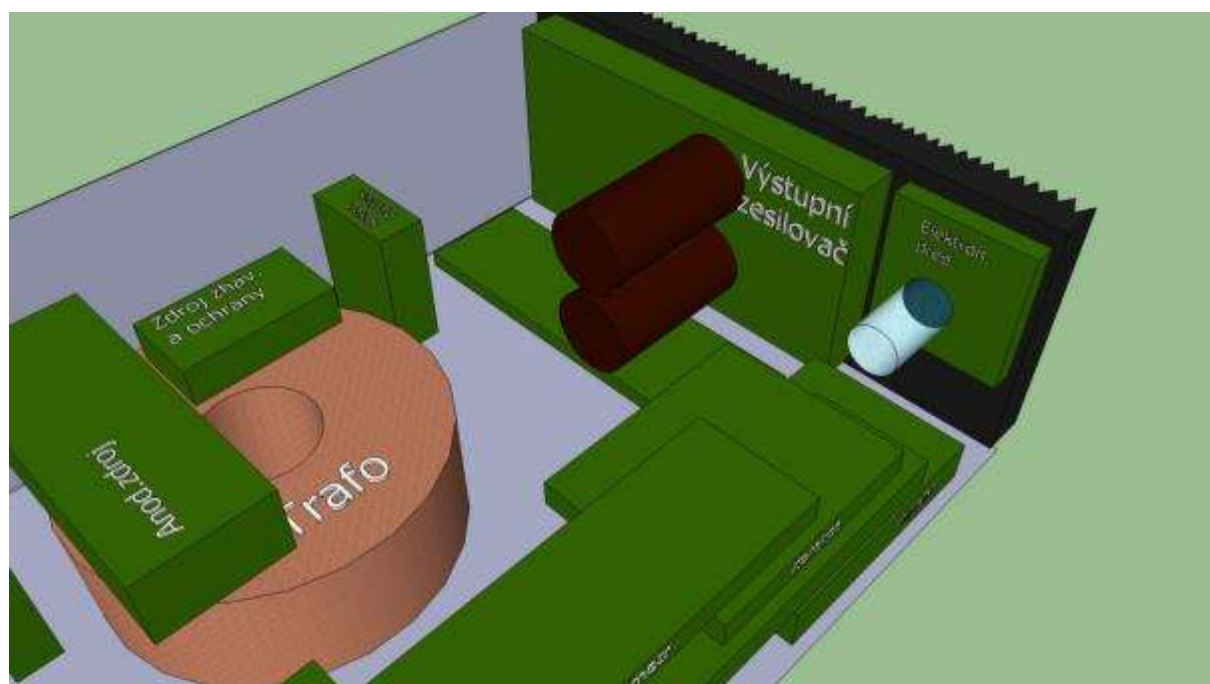
Na předním panelu jsou 2x desky mikrofonního předzesilovače, 2x desky čtyřpásmového semiparametrického korektoru, deska obvodů vstupních regulací a deska VU metru. Desky na předním panelu budou přichyceny postupně nad sebou pomocí distančních sloupků.

Na následujících obrázcích jsou 3D modely ozvučovací skříni vytvořené programem SketchUp. Tento model slouží pro názornou demonstraci rozmístění desek a transformátoru ve skříni. Jednotlivé desky plošných spojů jsou zbarveny zelenou barvou, elektronky průhlednou skleněnou barvou, velké kondenzátory výstupního zesilovače tmavě hnědou, postranní chladiče (na kterých jsou uchyceny výstupní zesilovače a elektronkové předzesilovače) označeny barvou černou.

Za 3D modely následují fotky skutečné skříni. Skříň je zatím z jedné třetiny hotová.

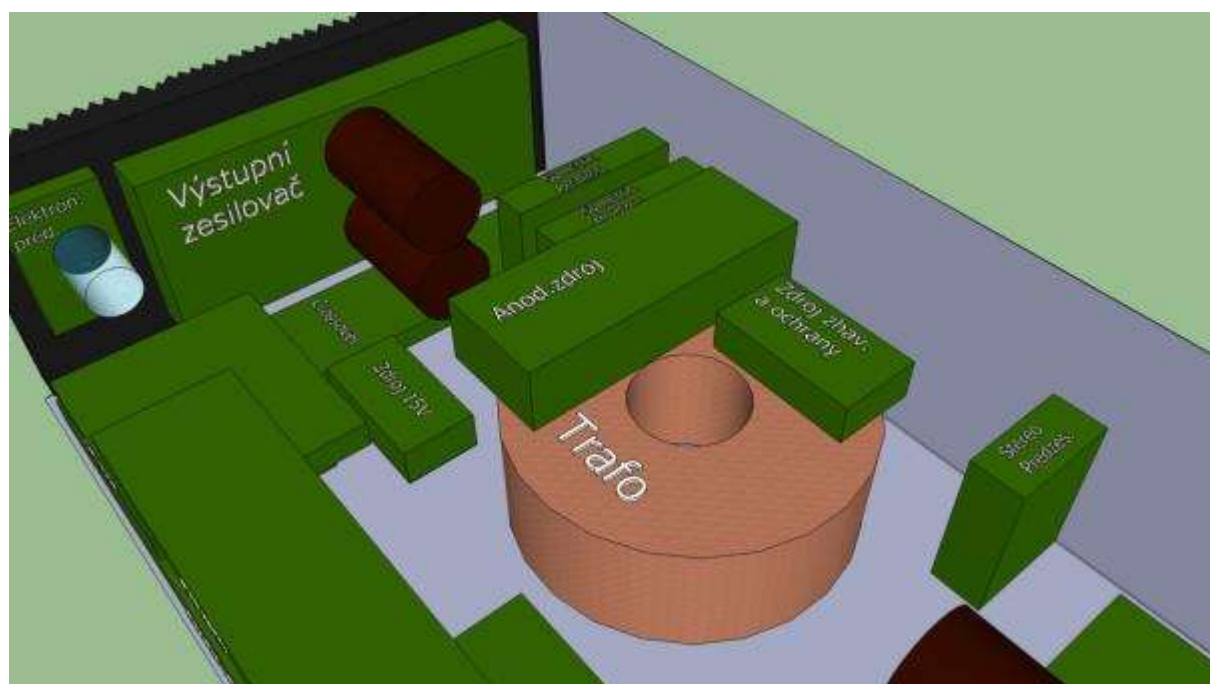


Obr. 51: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: přední pohled

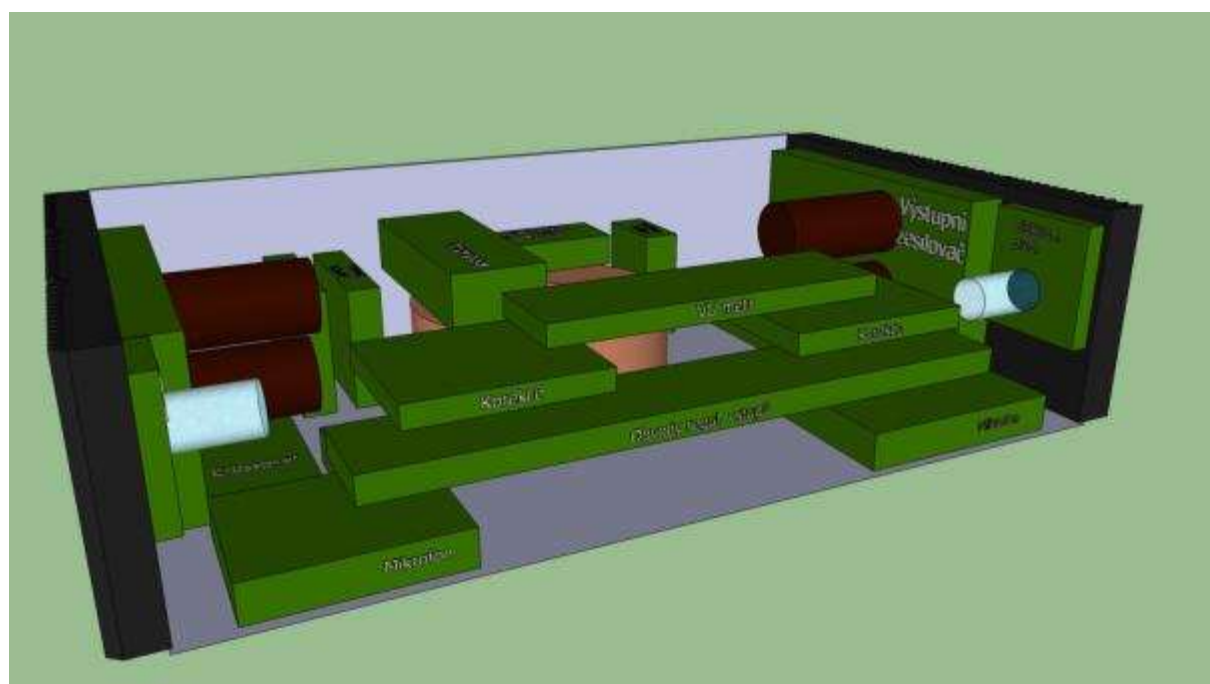


Obr. 52: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: boční pohled





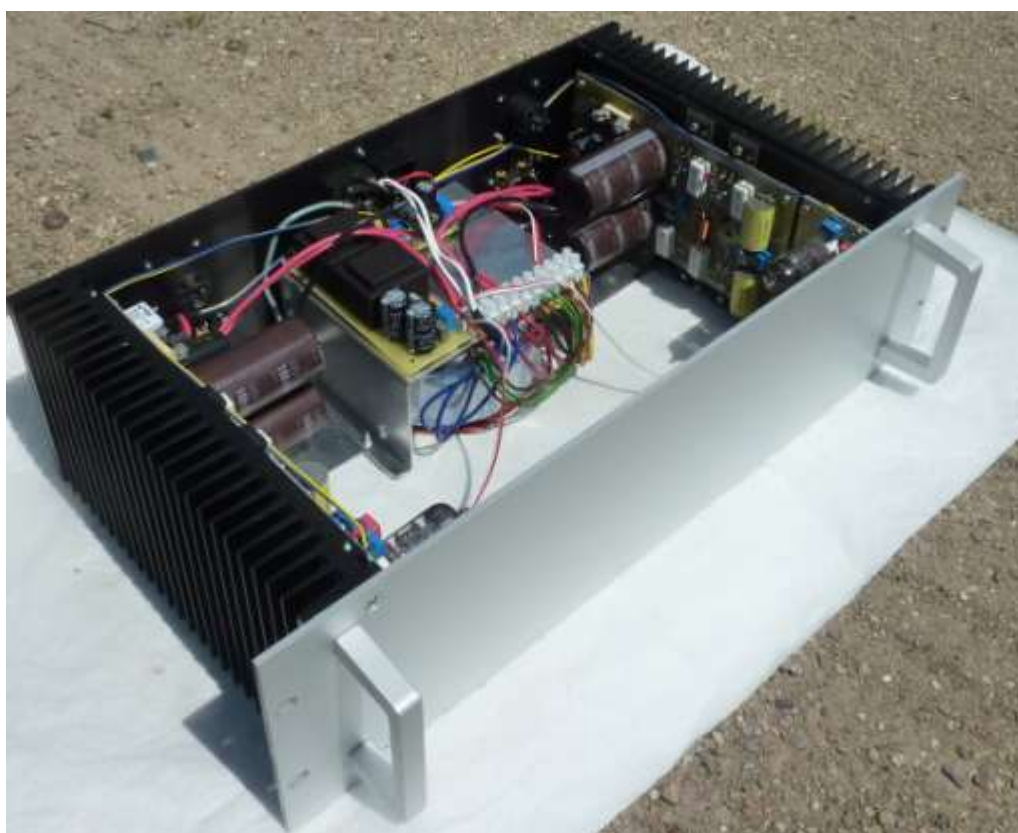
Obr. 53: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: boční pohled



Obr. 54: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: přední pohled

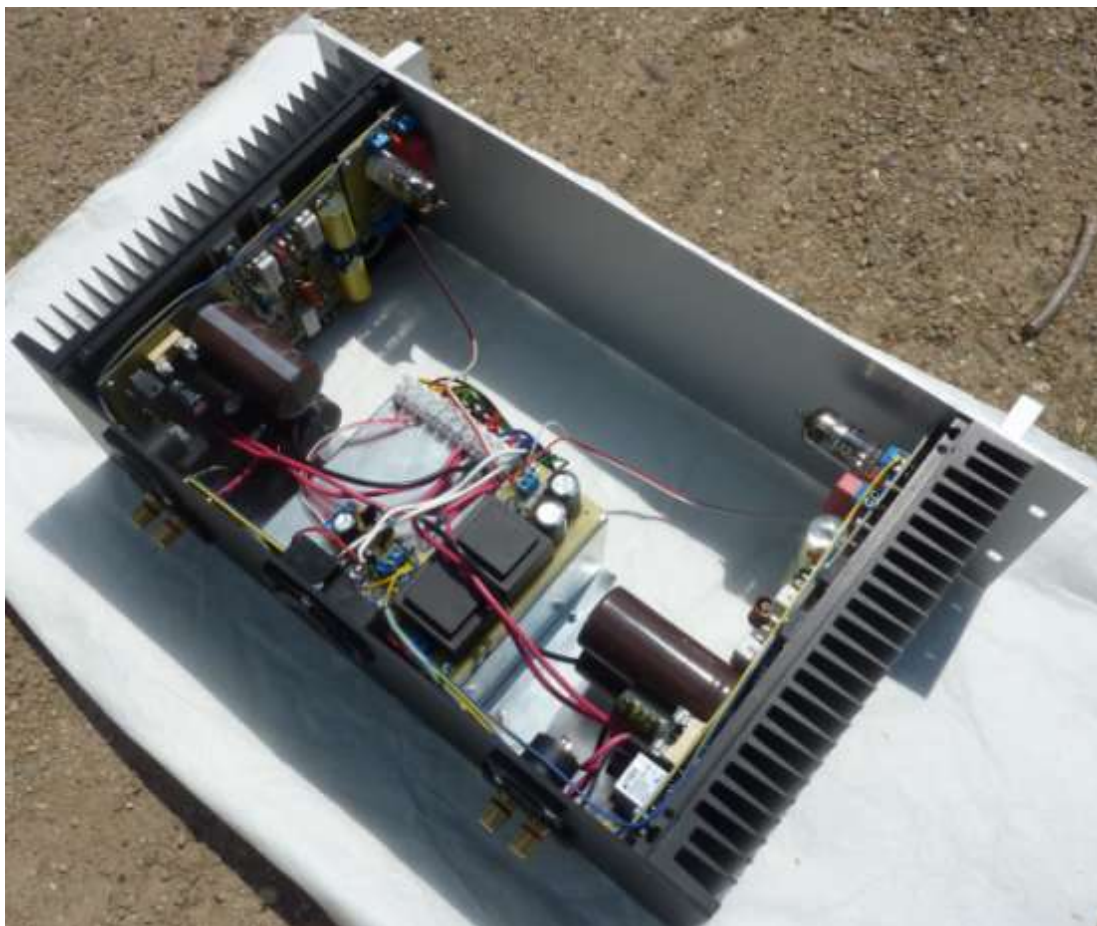


Obr. 55: Rozmístění desek plošných spojů ve skříni: vrchní pohled

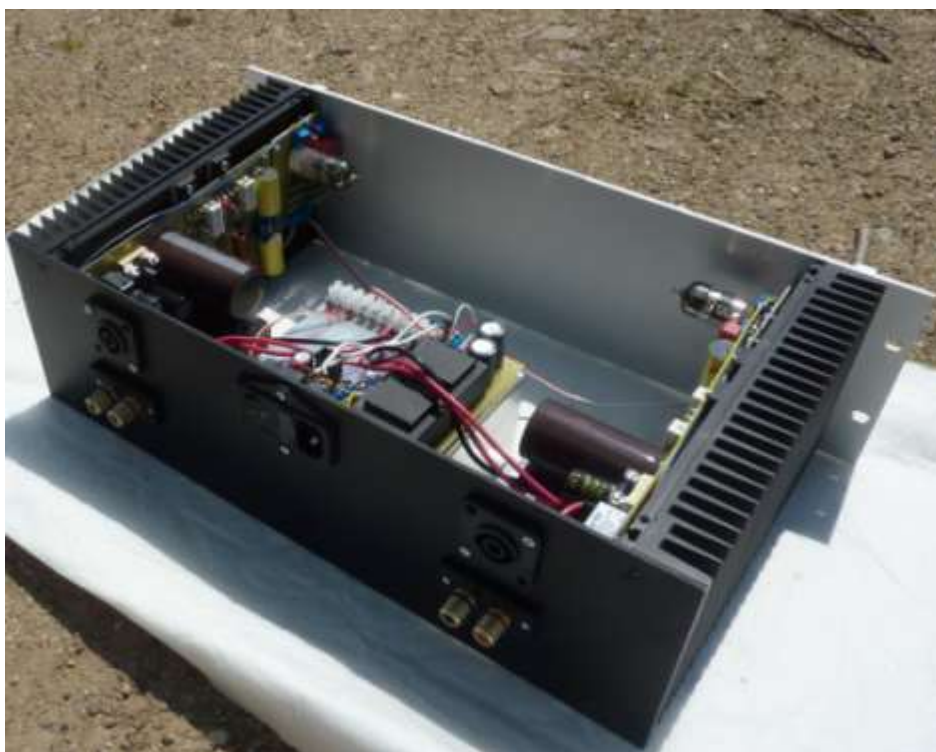


Obr. 56: Skutečná skříň: boční pohled





Obr. 57: Skutečná skříň: vrchní pohled



Obr. 58: Skutečná skříň: vrchní pohled: zadní pohled

## 5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnutí ozvučovací aparatury. První část práce je věnována teorii základních částí aparatury. Popsal jsem zde např. mikrofony, zesilovače, kmitočtové filtry, výhybky, reprosoustavy a reproduktory, tj. základní části nezbytné pro hlavní činnost ozvučovacího systému. V různých literaturách a v internetových zdrojích je celá řada korektorů, jednoduché i složité, vybral jsem nejvhodnější, co se týče složitosti i účelu, čtyřpásmový semiparametrický korektor. Ostatní zapojení jsou také vybrány stejným způsobem. Výstupní výkonový zesilovač obsahuje výkonové MOSFET tranzistory pro dostatečné zesílení, zapojení je kombinováno s elektronkovým předzesilovačem a ochranným obvodem. Výstupní výkon tohoto zesilovače dosahuje až 120 W, při dostatečně velkém vstupním signálu. Všechny předložené zapojení jsou funkční, byly publikované v odborných časopisech, nebo poupraveny a čerpány z jiné literatury. Simulované hodnoty byly provedeny téměř u všech zapojení, měřené hodnoty u vybraných zapojení. Výsledky odpovídají požadavkům.

Všechna zapojení jsou navržena v programu Eagle, následně fyzicky vyrobena. Desky mikrofonního předzesilovače, crossoveru a výstupního výkonového zesilovače jsou prokoveny, ostatní jsou vyrobeny klasickou metodou. Některé jednoduché desky jsou jednostranné, ostatní složité oboustranné. Všechny součástky byly dostupné, některé např. velké elektrolity u výkonového zesilovače sehnány obtížněji.

Fyzické zhotovení diplomové práce se vykonalo díky náročnosti z jedné třetiny, zbytek práce bude provedeno v nejbližší době.

## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Mikrofony, 7.12.2013, dostupné na WWW:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrofon>

[2] Svoboda J., Brda J. *Elektroakustika do kapsy*. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1981.

[19] Dexon, konstrukce – teorie, 17.12.2013, dostupné na WWW:

<http://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/jak-spravne-hovorit-na-mikrofon.html>

[4] Tkotz K. *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: BEN – technická literatura, 2006.

[5] Punčochář J. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: SNTL – státní nakladatelství technické literatury, 2002.

[6] Kesl J. *Elektronika I analogová technika*. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

[7] Kovařík B., Smetana C. *Korektory*. Praha: SNTL – státní nakladatelství technické literatury, 1965.

[8] Tilč, Z. Schéma symetrického a stereofonního předzesilovače. Purkyňova 98, 612 00 Brno. 10.2.2014

[9] <http://www.trunky.cz/bp/bipolar/stranky/schemata.htm>

[10] Světla a zvuk, Rubrika pro zájemce o zvukovou a světelnou techniku. *Amatérské rádio*, ročník LVIII/2009, č. 9. Amaro, 2009.

[11] Světla a zvuk, Rubrika pro zájemce o zvukovou a světelnou techniku. *Amatérské rádio*, ročník LIX/2010, č. 10. Amaro, 2010.

[12] Světla a zvuk, Rubrika pro zájemce o zvukovou a světelnou techniku. *Praktická elektronika*, ročník XVI (LX)/2011, č. 5. Amaro, 2011.

[13] Budínský J. *Nízkofrekvenční tranzistorové zesilovače*. Praha: SNTL – státní nakladatelství technické literatury, 1961.

[14] Elektronky, 4.11.2013, dostupné na WWW:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronka>

[15] Rezonanční obvody, 24.7.2013, dostupné na WWW:

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonanční\\_obvod](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonanční_obvod)

[16] Reproduktorová soustava, 11.3.2013, dostupné na WWW:

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktorová\\_soustava](http://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktorová_soustava)

[17] Zesilovač, 10.6.2013, dostupné na WWW:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Zesilovač>

[18] Ozvučnice (reproduktorová soustava), 13.1.2011, dostupné na WWW:

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Ozvučnice\\_\(reproduktorová\\_soustava\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Ozvučnice_(reproduktorová_soustava))

[19] Merhaut J. a kolektiv. *Příručka elektroakustiky*. Praha: SNTL – státní nakladatelství technické literatury, 1964.

[20] Konstrukce reproduktorových výhybek, 17.12.2013, dostupné na WWW:

<http://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/konstrukce-reproduktorovych-vyhybek.html>

[21] Konstrukce ozvučnice reprosoustavy, 17.12.2013, dostupné na WWW:

<http://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/konstrukce-ozvucnice-reprosoustavy.html>

[22] Konstrukce a výběr reproduktorů, 17.12.2013, dostupné na WWW:

<http://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/konstrukce-a-vyber-reproduktoru.html>

[23] Světla a zvuk, Rubrika pro zájemce o zvukovou a světelnou techniku. *Amatérské rádio*, ročník LIV/2005, č. 11. Amaro, 2005.

[24] Světla a zvuk, Rubrika pro zájemce o zvukovou a světelnou techniku. *Amatérské rádio*, ročník LVI/2007, č. 9. Amaro, 2007.

[25] Světla a zvuk, Rubrika pro zájemce o zvukovou a světelnou techniku. *Amatérské rádio*, ročník LVII/2008, č. 6. Amaro, 2008.

[26] Tilč, Z. Schéma vstupních regulací. Purkyňova 98, 612 00 Brno. 15.2.2014

[27] Tilč, Z. Schéma obvodů výstupů. Purkyňova 98, 612 00 Brno. 15.2.2014

[28] Tilč, Z. Schéma výstupního zesilovače s ochranným obvodem a elektronkovým předzesilovačem. Purkyňova 98, 612 00 Brno. 28.9.2013

[29] Tilč, Z. Schéma anodového zdroje. Purkyňova 98, 612 00 Brno. 15.2.2014

[30] Tilč, Z. Schéma zdroje pro žhavení elektronek a ochranný obvod výstupního zesilovače. Purkyňova 98, 612 00 Brno. 15.2.2014

## 8. PŘÍLOHY

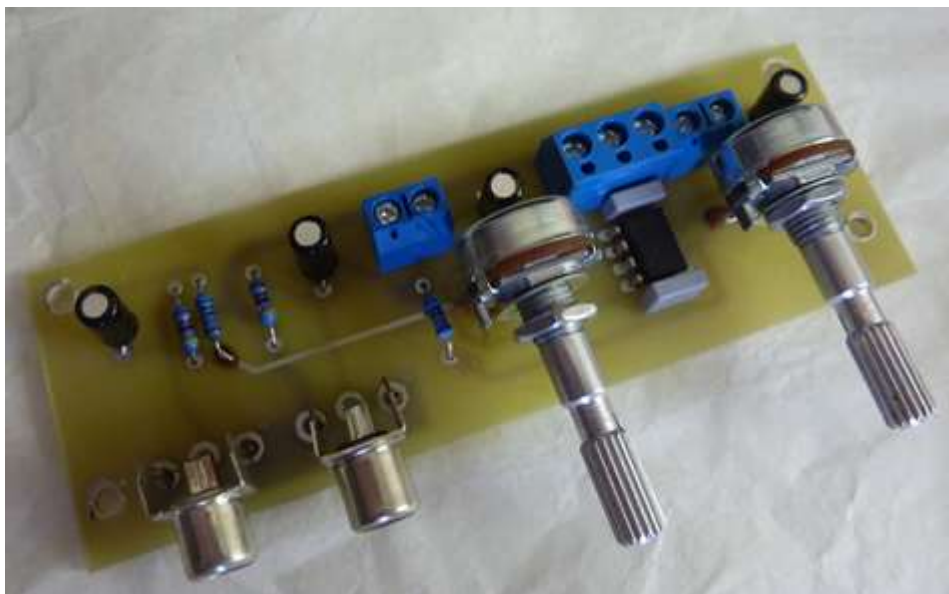


Příloha 1: Deska plošného spoje mikrofonního předzesilovače



Příloha 2: Deska plošného spoje symetrického předzesilovače

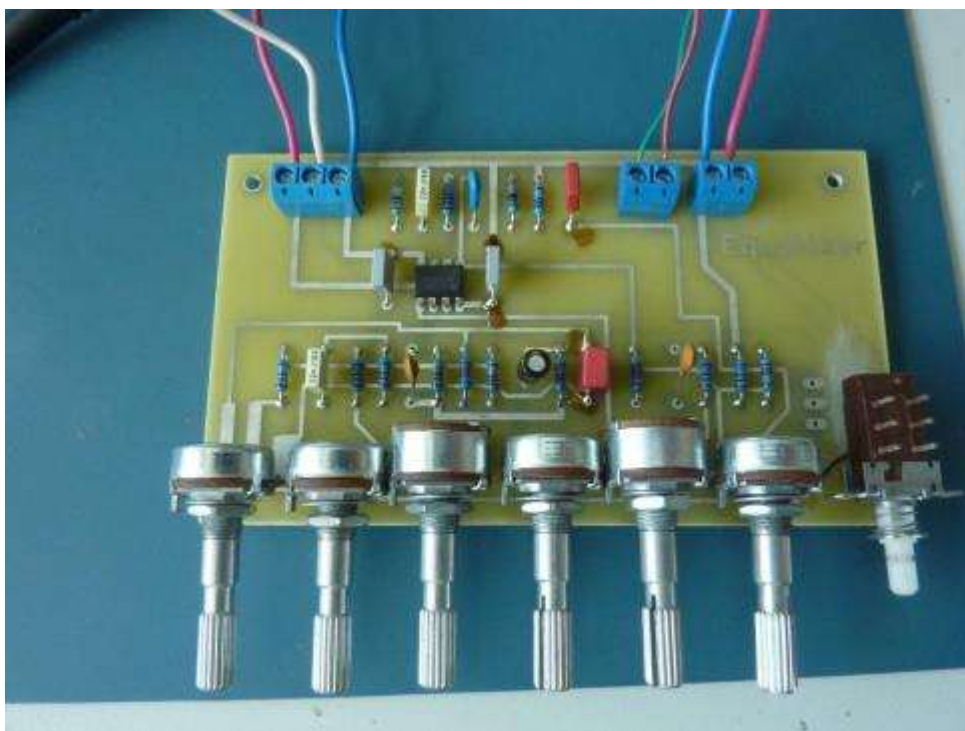




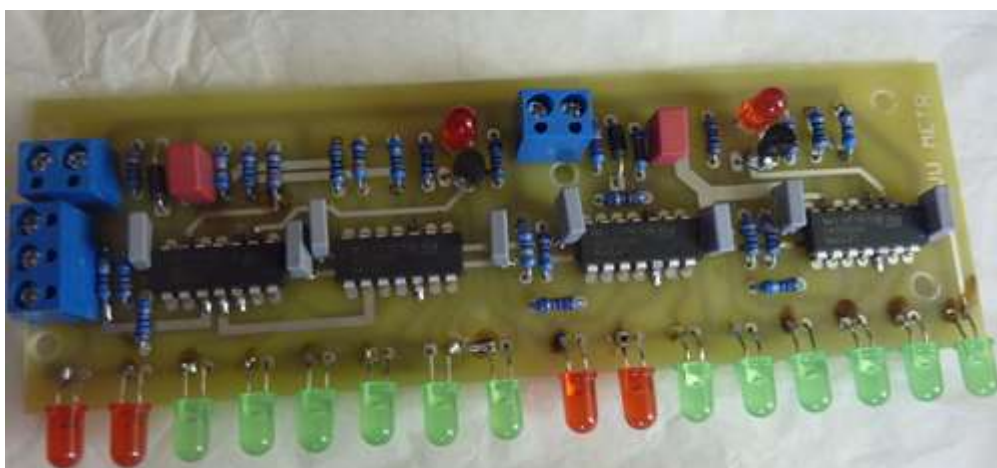
Příloha 3: Deska plošného spoje stereofonního předzesilovače



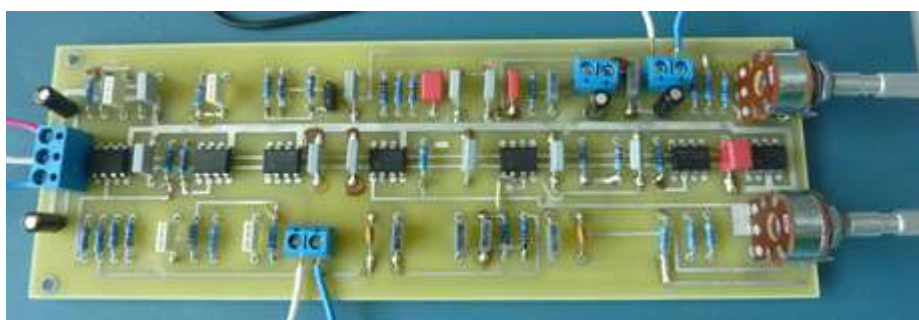
Příloha 3: Deska plošného spoje obvodů vstupních regulací



Příloha 4: Deska plošného spoje čtyřpásmového semiparametrického korektoru



Příloha 5: Deska plošného spoje VU metru



Příloha 5: Deska plošného spoje crossoveru

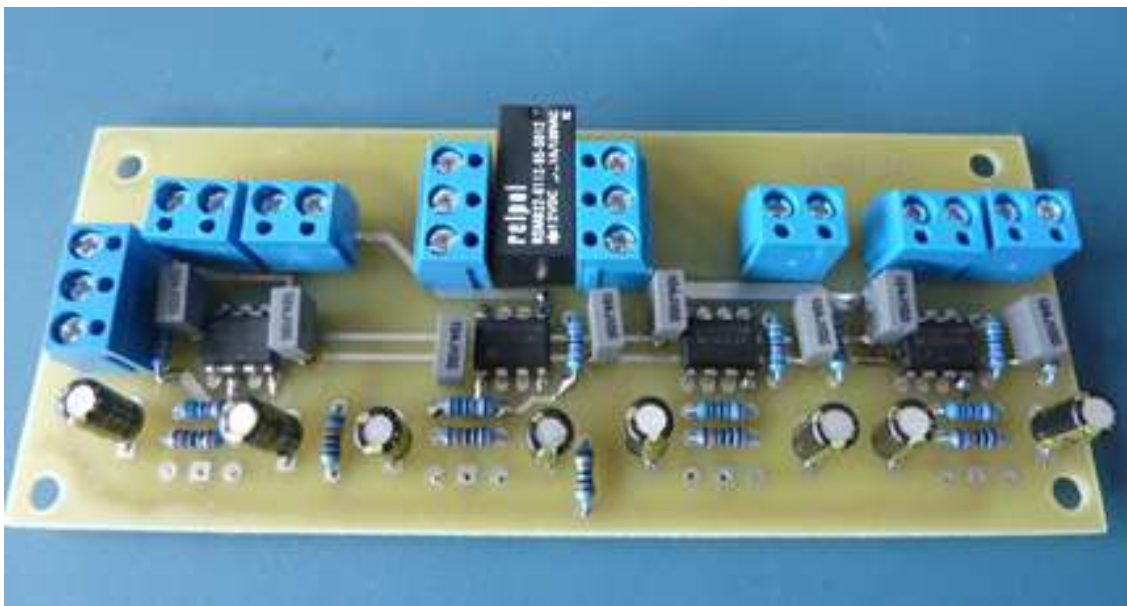


Příloha 6: Deska plošného spoje výstupního zesilovače s elektronkovým předzesilovačem

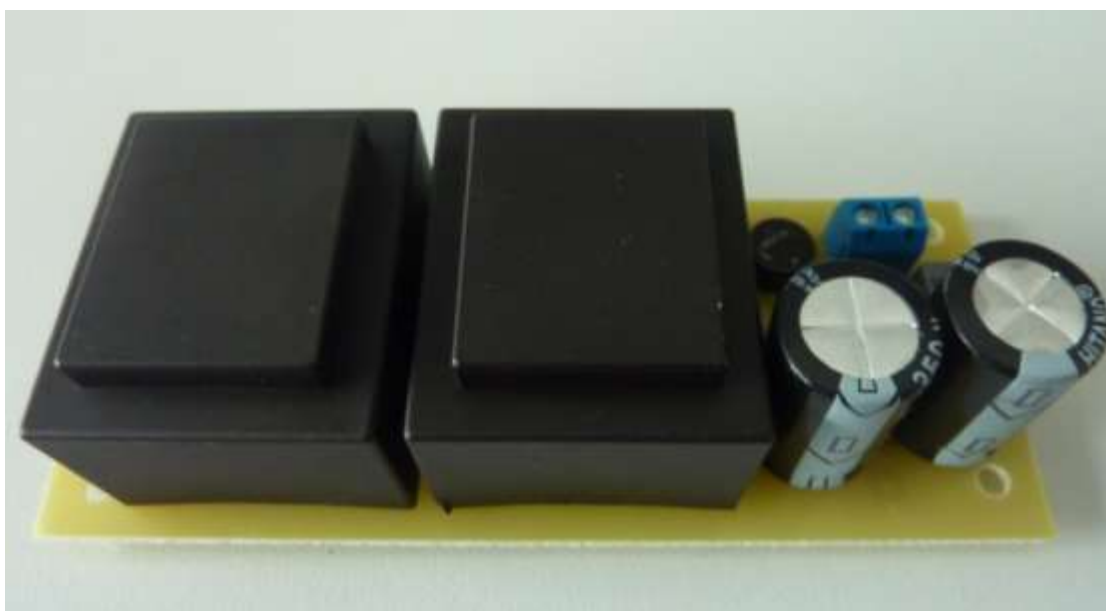


Příloha 7: Deska plošného spoje výstupního zesilovače s elektronkovým předzesilovačem





Příloha 8: Deska plošných spojů obvodů výstupů



Příloha 9: Deska plošných spojů anodového zdroje



Příloha 10: Deska plošných spojů zdroje napětí pro žhavení elektronek a ochranný obvod výstupního zesilovače